

Piccola Biblioteca 450

Richard P. Feynman

SEI PEZZI FACILI



ADELPHI

«possiamo immaginare che questo complicato apparato di cose in movimento che chiamiamo “mondo” sia simile a una partita di scacchi giocata dagli dèi, di cui noi siamo spettatori. Non conosciamo le regole del gioco; tutto ciò che ci è permesso è guardare la partita. Naturalmente, se guardiamo abbastanza a lungo, alla fine afferreremo alcune regole di base. Le regole del gioco sono ciò che chiamiamo fisica fondamentale».

Le lezioni di fisica di Feynman sono ormai leggendarie per la loro perspicuità ed efficacia. Quelle che qui presentiamo sono le prime (saranno seguite da *Sei pezzi meno facili*) e partono da zero. Nel primo «pezzo», dopo una breve introduzione ai metodi e al significato della ricerca - tre paginette che valgono intere biblioteche di testi epistemologici -, si dice di che cos'è fatta la materia che cade sotto i nostri sensi: atomi in moto. Nel secondo si spiega che non tutto è così limpido come sembra, e che nella materia c'è anche dell'altro: il mondo quantistico e i suoi paradossi. Senza addentrarsi in una ricostruzione storica, Feynman riesce tuttavia a darci il senso dell'evolversi della fisica nel secolo appena trascorso, mettendone in luce i legami con le altre scienze. Gli ultimi tre saggi selezionano altrettanti capisaldi (energia, gravitazione, la realtà quantistica), presentati a livelli di complessità crescente: a ogni lettura cade una buccia della magica cipolla e si apre un nuovo, affascinante scenario. *Chi prevedesse di naufragare su un'isola deserta, e volesse esser certo di avere con sé l'essenziale di quel che sappiamo sul mondo fisico, potrà mettere nello zaino i Sei pezzi facili.*

Traduzione di Laura Servidei.

Richard P. Feynman

SEI PEZZI FACILI

Traduzione di Laura Servidei



ADELPHI EDIZIONI

TITOLO ORIGINALE:

Six easy pieces

© 1963, 1989, 1995 California institute of technology

©2000 adelphi edizioni s.p.a. MILANO

ISBN 88-459-1551-4

PREFAZIONE

Queste sono le lezioni di fisica che ho tenuto nel 1961 e 1962 agli studenti del primo e secondo anno del Caltech (California Institute of Technology). Naturalmente non sono riportate parola per parola: sono state rivedute, a volte in modo sostanziale, a volte no. Le lezioni formano soltanto una parte del corso completo. L'intero gruppo di centottanta studenti si riuniva in una grande aula due volte la settimana per ascoltare queste lezioni, e poi si divideva in piccoli gruppi di quindici o venti studenti per le esercitazioni sotto la guida di un assistente; inoltre vi era una sessione di laboratorio una volta la settimana.

L'obiettivo principale che ci eravamo prefissi era conservare l'interesse degli studenti che, pieni di entusiasmo e piuttosto intelligenti, arrivano al Caltech dalle scuole superiori. Hanno sentito parlare molto di quanto siano appassionanti e interessanti certi campi della fisica: ad esempio la teoria della relatività, la meccanica quantistica, e altre idee moderne. Capitava invece che al termine del corso molti di loro fossero scoraggiati, perché avevano visto ben poche idee veramente grandi, nuove e moderne. Avevano dovuto studiare piani inclinati, elettrostatica e così via, e dopo due anni erano proprio avviliti. Si trattava quindi di costruire un corso in cui i più bravi e motivati non perdessero l'entusiasmo. Queste lezioni non intendono essere in alcun modo una semplice rassegna; sono una cosa seria. Pensai di prendere come punto di riferimento i migliori della classe, e di far sì che nemmeno loro riuscissero a comprendere del tutto il contenuto delle lezioni, per esempio suggerendo applicazioni delle idee e dei concetti in varie direzioni, al di fuori della linea principale di ragionamento. Proprio per questo ho cercato di formulare ogni asserzione nel modo più accurato possibile, di sottolineare ogni volta come le equazioni e le idee si integrino nel corpo di conoscenze della fisica, e quali modifiche sarebbero intervenute una volta che si fosse imparato di più. Sentivo anche che per gli studenti è importante aver chiaro che cosa dovrebbero essere in grado di dedurre da quanto detto in precedenza (se sono abbastanza svegli), e cosa invece viene presentato come nuovo.

Quando venivano introdotte nuove idee, io cercavo o di dedurle, se erano deducibili, o di spiegare che si trattava di un concetto nuovo, che non aveva alcuna base nelle cose che già avevano imparato: non era dimostrabile, bisognava proprio aggiungerlo.

Nell'iniziare le lezioni presupponevo alcune conoscenze di base da parte degli studenti, cose come l'ottica geometrica, semplici nozioni di chimica, e così via, che si insegnano alle superiori. Inoltre non vedevo ragione di presentare il materiale in un ordine preciso, evitando di parlare di una cosa finché non avessi potuto descriverla in ogni particolare. Al contrario, c'erano continue anticipazioni di argomenti non ancora trattati: una completa discussione sarebbe venuta a suo tempo, con una preparazione adeguata. L'induttanza e i livelli di energia, per esempio, vengono dapprima presentati a livello qualitativo, e solo in seguito diventano oggetto di uno studio approfondito.

Mentre mi rivolgevo agli studenti più attivi, non volevo trascurare il povero studente per il quale i fuochi d'artificio e le applicazioni collaterali sono semplicemente inquietanti, e dal quale sarebbe vano aspettarsi che impari molto del contenuto delle lezioni. A questi studenti volevo presentare almeno un nucleo centrale o spina dorsale della materia che fossero in grado di comprendere. Magari non avrebbero capito tutto, ma potevo sperare che non si innervosissero troppo. Non mi aspettavo che capissero tutto, ma solo le caratteristiche centrali e più dirette. Ci vuole, naturalmente, una certa perspicacia da parte dello studente per capire quali sono i teoremi e le idee più importanti, e quali invece gli argomenti che si potranno comprendere solo negli anni seguenti.

Nel fare lezione c'era poi una seria difficoltà: per come era strutturato il corso, chi era in cattedra non aveva modo di capire come stessero andando le cose, dal momento che gli mancava qualsiasi riscontro da parte degli studenti. Io stesso quindi non ho idea di quanto siano buone queste lezioni. È stato essenzialmente un esperimento; se dovessi rifarlo (e spero di non doverlo rifare!) non lo rifarei allo stesso modo. Comunque penso, per quanto riguarda la fisica, che le cose abbiano funzionato abbastanza bene per il primo anno.

Nel secondo anno non fui altrettanto soddisfatto. In particolare, nel trattare di elettricità e magnetismo, non sono riuscito a trovare un modo veramente unico o diverso di presentare la materia, alcun

modo che fosse particolarmente più avvincente di quello usuale. Quindi non credo di aver fatto un granché in questa parte. Alla fine del secondo anno avevo intenzione di aggiungere in coda all'elettromagnetismo un paio di lezioni, per dire qualcosa sulle proprietà dei materiali, e soprattutto per introdurre i modi fondamentali, le soluzioni dell'equazione di diffusione, i sistemi vibranti, le funzioni ortogonali, ecc., per fare insomma i primi passi nei cosiddetti metodi matematici della fisica. Se dovessi, oggi, rifare il corso penso che tornerei all'idea originaria; ma allora, dato che non era previsto un nuovo ciclo di lezioni, sembrò una buona idea cercare di dare piuttosto un'introduzione alla meccanica quantistica (che si trova nel terzo volume delle *Lectures*).

Certo, chi si laurea in fisica può aspettare fino al terzo anno per imparare la meccanica quantistica, ma molti studenti del nostro corso - si disse - sceglievano fisica solo come materia propedeutica per altre discipline; e il modo standard di presentare la meccanica quantistica la rendeva quasi inaccessibile ai più, perché ci vuole tanto tempo per impararla. Eppure, nelle sue applicazioni reali (specialmente in quelle più complesse, per esempio di ingegneria elettrica e di chimica) non viene effettivamente usato tutto il macchinario delle equazioni differenziali. Così ho cercato di darne un'illustrazione generale che non richiedesse la conoscenza delle equazioni differenziali alle derivate parziali. Anche per un fisico penso sia interessante sforzarsi di presentare la meccanica quantistica in ordine inverso, per ragioni che risulteranno chiare dalle lezioni stesse. Ho però l'impressione che l'esperimento non sia del tutto riuscito, soprattutto per mancanza di tempo (avrei avuto bisogno di tre o quattro lezioni in più, per trattare con maggiore completezza argomenti quali le bande di energia e la dipendenza spaziale delle ampiezze). Inoltre, essendo la prima volta, la mancanza di riscontro da parte degli studenti fu particolarmente grave. Oggi penso che la meccanica quantistica andrebbe presentata in un secondo momento; forse avrò l'occasione di farlo di nuovo, un giorno, e allora lo farò nel modo giusto.

Non ci sono, nel corso, lezioni su come risolvere i problemi, perché per questo c'erano le ore di esercitazioni. In effetti avevo svolto tre lezioni al primo anno sull'argomento, ma non sono incluse in questa raccolta. C'era anche una lezione sulla guida inerziale, certamente appropriata dopo la lezione sui sistemi rotanti, ma sfortunatamente è stata omessa. La quinta e la sesta lezione sono state tenute da

Matthew Sands, essendo io fuori città.

La domanda, ovvia, è fino a che punto l'esperimento sia riuscito. La mia impressione - peraltro non condivisa da quasi nessuno che abbia lavorato con gli studenti - è negativa. Non penso di aver fatto un buon lavoro, dal punto di vista degli studenti. Se guardo come la maggioranza di loro ha affrontato le prove d'esame, devo concludere che il sistema è fallito. Naturalmente qualche collega mi fa notare che una o due decine di studenti - sorprendentemente - avevano capito tutto in ogni lezione, avevano lavorato seriamente e avevano affrontato le cose con entusiasmo e interesse. È presumibile che queste persone abbiano una preparazione di base di prim'ordine in fisica; dopotutto sono proprio quelli che cercavo di raggiungere. Ma ciò significa, allora, che «di rado l'insegnamento è veramente efficace, tranne in quei casi felici in cui è quasi superfluo» (Gibbons). Eppure, non volevo lasciare indietro del tutto nessuno, come invece, forse, è successo. Penso che per dare una mano agli studenti bisognerebbe mettere più impegno nell'inventare problemi che chiariscano i concetti presentati a lezione. Esercizi e problemi forniscono una buona opportunità di completare l'argomento e rendere più reali, più complete, più salde nella mente le idee.

A mio avviso, comunque, non c'è soluzione al problema dell'istruzione, oltre a rendersi conto che l'insegnamento migliore è quello che si realizza nel rapporto diretto tra lo studente e un buon insegnante: la situazione in cui lo studente discute le idee, riflette sulle cose, e ne parla. Non si impara molto stando seduti in un'aula, e neppure facendo i compiti assegnati, ma di questi tempi dobbiamo istruire una tal massa di gente che è necessario trovare un'alternativa all'ideale. Forse queste lezioni daranno un contributo in tal senso; forse in qualche oasi felice, dove c'è ancora un rapporto individuale tra studenti e insegnanti, qualcuno ne potrà trarre ispirazione, o qualche buona idea. Forse si divertiranno a pensarci su, o a proseguire nello sviluppo di qualche concetto.

Giugno 1963¹

Nota

I capitoli di questo libro sono stati originariamente pubblicati nell'opera in tre volumi *Richard P. Feynman, Lectures on Physics*, Addison-Wesby, Reading, Mass., 1963-1965: vol. I, capp. 1-4 e 7; vol. II, cap. 37.

I

ATOMI IN MOVIMENTO

Introduzione

Questo corso biennale di fisica viene presentato partendo dall'idea che il lettore intenda diventare un fisico. Questo, naturalmente, non è sempre vero, ma è quanto ogni professore, di qualsiasi materia, presume! Per diventare un fisico bisogna studiare molto: l'equivalente di duecento anni di conoscenza nel campo in più rapido sviluppo che ci sia. Così tanto, infatti, che potreste pensare di non farcela nei quattro anni del corso di laurea; e in effetti ci vogliono anche gli anni di dottorato.

Abbastanza sorprendentemente, malgrado la spaventosa mole di lavoro compiuto in tutto questo tempo, è possibile in gran parte condensare l'enorme quantità dei risultati raggiunti, cioè trovare leggi che riassumano l'intero nostro sapere. Ma, anche così, le leggi sono tanto difficili da recepire che sarebbe sleale nei vostri confronti iniziare l'indagine di questo arduo argomento senza dare una qualche idea dei rapporti che legano tra loro i vari campi della scienza. I primi tre capitoli saranno quindi dedicati a delineare la relazione tra la fisica e le altre scienze, i rapporti tra una scienza e l'altra, e il significato della scienza, in modo da aiutarci a sviluppare una percezione dell'argomento. Vi chiederete perché mai non si possa insegnare la fisica dando semplicemente le leggi fondamentali a pagina uno e mostrando poi come funzionano in tutte le possibili circostanze, come si fa con la geometria euclidea, dove prima si stabiliscono gli assiomi e poi se ne traggono ogni genere di deduzioni. (Così, non contenti di apprendere la fisica in quattro anni, la volete imparare in quattro minuti!). Questo non si può fare per due ragioni. Primo, non conosciamo ancora tutte le leggi fondamentali: la frontiera dell'ignoranza si sta espandendo. Secondo, la corretta enunciazione delle leggi della fisica chiama in causa idee poco familiari, la cui descrizione richiede concetti di alta matematica, al punto che è necessario un tirocinio non indifferente anche solo per imparare cosa significano le parole. No, non è possibile procedere in questo modo. Si può solo procedere passo per passo. Ogni passo, ogni parte dell'insieme della natura è solo un'approssimazione dell'intera verità, ovvero di quella che per

quanto ne sappiamo è l'intera verità. Ogni nostra conoscenza, in effetti, è un'approssimazione di un qualche tipo, perché sappiamo di non sapere ancora tutte le leggi. Perciò, tutto viene imparato solo per essere poi disimparato, o, più probabilmente, per venire corretto.

Il principio cardine della scienza, quasi la sua definizione, è che *la verifica di tutta la conoscenza è l'esperimento*. L'esperimento è il solo giudice della «verità» scientifica. Ma qual è la fonte della conoscenza? Da dove vengono le leggi da verificare? L'esperienza stessa aiuta a produrre le leggi, nel senso che ci dà dei suggerimenti. Ma ci vuole anche fantasia per creare da questi suggerimenti le grandi generalizzazioni, per indovinare gli schemi meravigliosi, semplici eppure molto strani che reggono tutto, e poi sperimentare per verificare se abbiamo veramente indovinato. Questo processo immaginativo è così difficile che nella fisica ci si divide il lavoro: ci sono i fisici teorici che inventano, deducono, e tirano a indovinare le nuove leggi, ma non le sperimentano, e ci sono i fisici sperimentali che fanno gli esperimenti, inventano, deducono e tirano a indovinare.

Abbiamo detto che le leggi di natura sono approssimate: che prima si scoprono quelle sbagliate, e poi quelle giuste. Ora, come può un esperimento essere «sbagliato»? Prima di tutto, in modo banale: per esempio se c'è qualcosa che non va nell'apparecchiatura e non l'abbiamo notato. Ma queste cose si possono aggiustare facilmente e venire ricontrollate più volte. Quindi, a parte queste cose di minor conto, com'è possibile che il risultato di un esperimento sia sbagliato? Solo se è poco preciso. Per esempio, la massa di un oggetto sembra non cambiare mai: una trottola in rotazione pesa quanto una ferma. Si inventò allora una «legge»: la massa di un corpo è costante e non dipende dalla velocità. Ora si è scoperto che questa legge è inesatta: la massa aumenta con la velocità, ma aumenti sensibili richiedono velocità vicine a quelle della luce. Una legge *corretta* è: se un oggetto si muove a velocità inferiore a centocinquanta chilometri al secondo, la sua massa è costante a meno di uno su un milione. In questa formulazione approssimata la legge è corretta. Si può pensare che, in pratica, la nuova legge non faccia poi una gran differenza. Be', sì e no. Per velocità normali si può certamente usare la semplice legge della massa costante come una buona approssimazione. Ma per velocità molto alte è sbagliata, e più la velocità è alta, maggiore è l'errore.

Infine, da un punto di vista filosofico - e questo è l'aspetto più interessante - faremmo un errore madornale a prendere per buona la legge approssimata. Anche se la massa cambia di pochissimo, l'intera rappresentazione del mondo dev'essere cambiata. Questo è un fatto caratteristico della filosofia, ossia delle idee che stanno dietro alle leggi: a volte anche un effetto molto piccolo richiede profondi cambiamenti nelle idee. Ora, che cosa dovremmo insegnare per prima? La legge corretta, ma poco familiare, con il suo apparato concettuale strano e difficile (per esempio la teoria della relatività, lo spazio-tempo a quattro dimensioni, e così via)? Oppure la semplice legge della massa costante, che sarà approssimata, ma non richiede idee astruse? La prima è più appassionante, più bella e più divertente, ma la seconda è più accessibile, ed è il primo passo per capire veramente l'altra idea. Questo dilemma riappare in continuazione quando si insegna fisica. Ogni volta lo risolveremo in modo diverso, ma a ogni passo varrà la pena di imparare quello che è noto ora, qual è il grado della sua precisione, come si inserisce nel quadro più generale della conoscenza e come si potrà cambiare quando ne sapremo di più.

Procediamo ora delineando la mappa generale della nostra odierna comprensione della scienza (della fisica in particolare, ma anche di altre scienze periferiche), così che quando, più tardi, dovremo mettere a fuoco qualche punto specifico avremo una certa idea dello sfondo, del perché quel punto è interessante, e come si inserisce nella struttura generale. Dunque, qual è la nostra visione globale del mondo?

La materia è fatta di atomi

Se in qualche cataclisma andassero perdute tutte le conoscenze scientifiche, e una sola frase potesse essere tramandata alle generazioni successive, quale enunciato conterrebbe la maggiore informazione nel minor numero di parole? Io credo si tratti dell'ipotesi atomica (o fatto atomico, se preferite), cioè che tutte le cose sono fatte di atomi, piccole particelle in perpetuo movimento che si attraggono a breve distanza, ma si respingono se pressate l'una contro l'altra. In questa frase, come vedremo, c'è una quantità

enorme di informazione su come è fatto il mondo; basta usare un po' di fantasia e di ragionamento.

Per illustrare la potenza dell'idea atomica, supponiamo di avere una goccia d'acqua del diametro di mezzo centimetro. Anche osservandola molto da vicino non vedremmo altro che acqua, omogenea e continua. Anche ingrandendola (circa duemila volte) con il miglior microscopio ottico a disposizione, e vedendola quindi larga una decina di metri, quanto una stanza spaziosa, guardando bene vedremmo ancora acqua relativamente omogenea, ma qua e là ci sarebbero delle cose a forma di uovo che nuotano avanti e indietro. Molto interessante. Sono parameci. A questo punto potremmo anche fermarci, talmente incuriositi dai parameci, con le loro ciglia vibratili e i corpi che si contorcono, da non andare oltre, tranne che, magari, per ingrandire ancora di più i parameci e guardare cosa c'è dentro. Questo, naturalmente, è un argomento che interessa i biologi, ma al momento noi sorvoliamo e guardiamo più da vicino l'acqua stessa, ingrandendola altre duemila volte. Ora la goccia d'acqua misura venti chilometri, e se la osserviamo attentamente noteremo una specie di brulichio, qualcosa che non ha più un aspetto omogeneo, ma sembra il pubblico di una partita di calcio visto molto da lontano. Per vedere a cosa sia dovuto questo brulichio, lo ingrandiremo altre duecentocinquanta volte e ci troveremo davanti agli occhi qualcosa di simile alla figura 1. È una rappresentazione dell'acqua ingrandita un miliardo di volte, ma idealizzata da molti punti di vista.

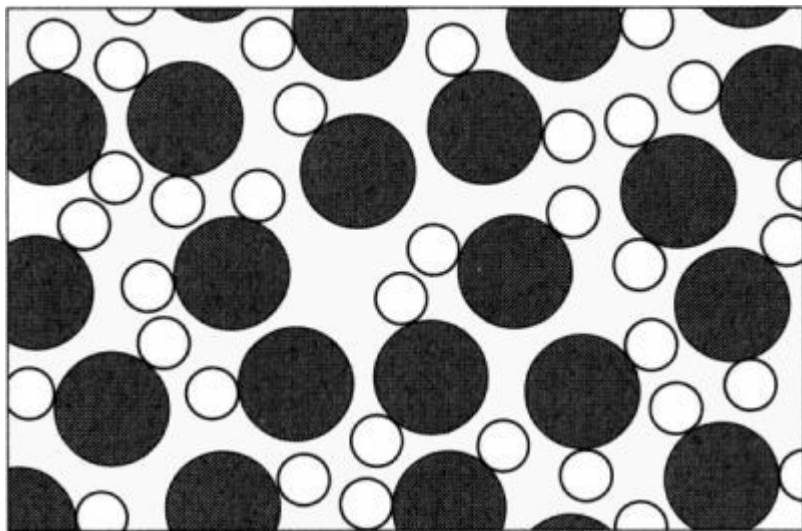


Fig. 1 - Acqua ingrandita un miliardo di volte.

Per cominciare, le particelle sono disegnate in modo semplice, con contorni netti, e questo non è esatto. In secondo luogo, la figura è bidimensionale, mentre naturalmente le particelle si muovono in tre dimensioni. Osservate che ci sono due diverse specie di «palle» o cerchi a rappresentare gli atomi di ossigeno (neri) e quelli di idrogeno (bianchi), e che ogni ossigeno ha due idrogeni legati a sé. (Ogni gruppetto di un ossigeno con i suoi idrogeni si chiama molecola). La rappresentazione è idealizzata anche perché in natura le particelle vere si agitano e rimbalzano continuamente, si torcono e girano l'una intorno all'altra. Bisogna pensare, anziché a un'immagine statica, a un'immagine dinamica. Un'altra cosa che non si può illustrare in un disegno è il fatto che le particelle sono attaccate, che si attraggono, questa tira quell'altra, ecc. L'intero gruppo è «incollato insieme», per così dire. D'altro canto, le particelle non possono compenetrarsi l'un l'altra. Se si cerca di comprimerle si respingono.

Gli atomi hanno un raggio di $1 \text{ o } 2 \times 10^{-8} \text{ cm}$, e dato che 10^{-8} cm si chiama *angstrom*, diciamo che gli atomi hanno un raggio di $1 \text{ o } 2 \text{ angstrom } (\text{\AA})$. Un altro modo per ricordarne la misura è il seguente: se una mela viene ingrandita fino alle dimensioni della Terra, i suoi atomi avranno all'incirca le dimensioni iniziali della mela.

Immaginiamo ora questa enorme goccia d'acqua, con tutte le sue particelle in agitazione che si rincorrono l'un l'altra. L'acqua

conserva il suo volume, non si dissolve, e questo è dovuto all'attrazione delle molecole tra loro. Se la goccia è su un piano inclinato, dove può muoversi da un punto all'altro, l'acqua scorre, ma non svanisce (cioè le parti che la compongono non si disperdono), grazie appunto all'attrazione molecolare. Il movimento di agitazione è ciò che noi rappresentiamo come *calore*: quando aumenta la temperatura aumenta il movimento. Se scaldiamo l'acqua, l'agitazione aumenta, così come aumenta il volume tra gli atomi, finché a un certo punto la forza di attrazione fra le molecole non è più sufficiente a tenerle insieme, ed esse si disperdono separandosi l'una dall'altra. Abbiamo ovviamente appena descritto la produzione di vapore acqueo mediante l'aumento della temperatura: le particelle si staccano e volano via a causa dell'intensificarsi del movimento.

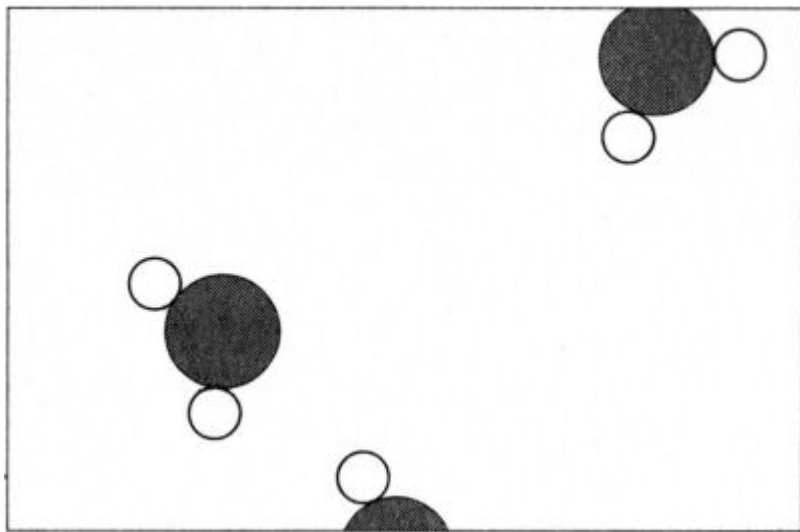


Fig. 2 - Vapore.

Nella figura 2 vediamo una rappresentazione del vapore, che è fuorviante in questo: a pressione atmosferica normale, in un'intera stanza ci sono magari solo poche molecole, e certamente non ne troveremmo tre in uno spazio così piccolo. Quasi tutti i riquadri di queste dimensioni sarebbero vuoti, mentre noi, guarda caso, ne abbiamo due e mezzo (tanto per non lasciare la finestra vuota). Ora, nel vapore le caratteristiche delle molecole si vedono meglio che

nell'acqua. Per semplicità nel disegno l'angolo tra gli atomi di idrogeno è di 120° , mentre in realtà misura $105^\circ 3'$, e la distanza tra il centro di un idrogeno e il centro dell'ossigeno è $0,957 \text{ \AA}$; come vedete conosciamo questa molecola molto bene. Vediamo ora alcune proprietà del vapore acqueo (o di qualunque altro gas). Le molecole, separate l'una dall'altra, rimbalzano contro le pareti. Immaginiamo una stanza con delle palle da tennis (diciamo un centinaio) che rimbalzano di qua e di là, in continuo movimento. Quando colpiscono la parete la spingono come per allontanarla dal centro della stanza (e naturalmente bisogna spingere dalla parte opposta, per tenerla al suo posto).

Ciò significa che il gas esercita una forza intermittente che i nostri sensi grossolani (non essendo noi ingranditi un miliardo di volte) percepiscono come *spinta media*; per confinare un gas dobbiamo applicare una pressione. La figura 3 mostra un tipico contenitore di gas (rappresentato in ogni libro di testo), cioè un cilindro con un pistone. Dato che la forma delle molecole d'acqua non ha nessuna importanza, per semplicità le disegniamo come palle da tennis, o puntini, che si muovono in ogni direzione.

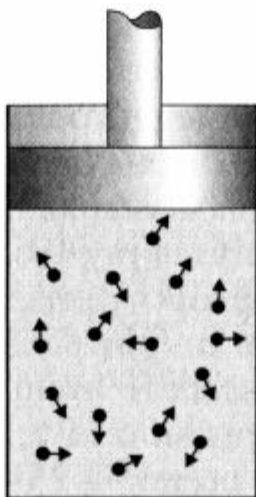


Fig. 3

Molte di esse colpiranno il pistone, e quindi per evitare che questo continuo bombardamento lo spinga poco per volta fuori dal cilindro bisogna applicargli una certa forza, che chiaramente sarà

proporzionale all'area: infatti, se si aumenta l'area mantenendo invariata la densità del gas (il numero di molecole per centimetro cubo), gli urti con il pistone aumentano in proporzione. La forza che si esercita sull'unità di superficie prende il nome di *pressione*; la forza totale è data quindi dal prodotto della pressione per l'area. Ora mettiamo in questo recipiente il doppio di molecole, in modo da raddoppiarne la densità, lasciando invariata la velocità, cioè la temperatura del gas. Allora, con buona approssimazione, il numero di urti verrà raddoppiato e, dato che ciascuno sarà tanto «energico» quanto prima, la pressione sarà doppia. In realtà, considerando la vera natura delle forze tra gli atomi, ci aspetteremmo, da un lato, una leggera diminuzione della pressione dovuta alle attrazioni fra gli atomi stessi, dall'altro, un leggero aumento per la limitatezza del volume da essi occupato. Ad ogni modo, se la densità è abbastanza bassa, così che non ci siano molti atomi, la pressione, con ottima approssimazione, è proporzionale alla densità. Osserviamo anche un'altra cosa: se aumentiamo la temperatura lasciando inalterata la densità del gas, cioè se aumentiamo la velocità degli atomi, cosa succede alla pressione? Be', gli atomi colpiscono più forte perché si muovono più velocemente, e inoltre colpiscono più spesso, quindi la pressione aumenta. Vedete quanto sono semplici le idee della teoria atomica. Consideriamo un'altra situazione. Supponiamo che il pistone si muova verso l'interno, in modo da costringere lentamente gli atomi in uno spazio minore. Cosa succede quando un atomo colpisce il pistone in movimento? È chiaro che in seguito all'urto la sua velocità aumenta. Lo si può vedere, per esempio, facendo rimbalzare una pallina da ping-pong contro una racchetta che si muova in avanti: la pallina guadagna velocità. (Caso particolare: se un atomo è fermo e il pistone lo colpisce, comincerà sicuramente a muoversi). Dunque tutti gli atomi nel recipiente sono «più caldi» dopo aver colpito il pistone, hanno guadagnato velocità, il che significa che *quando comprimiamo lentamente un gas, la sua temperatura aumenta*. Un gas si scalda se viene sottoposto a una lenta compressione, e si raffredda sotto una lenta espansione.

Ora torniamo alla nostra goccia d'acqua e osserviamone altri aspetti. Supponiamo di raffreddare la goccia, in modo che l'agitarsi delle molecole e degli atomi diminuisca progressivamente. Sappiamo che tra gli atomi ci sono forze di attrazione, quindi dopo un po' essi non riescono più a muoversi con facilità. A temperatura molto bassa la situazione è quella indicata nella figura 4: le molecole restano

incastrate in una nuova configurazione, il *ghiaccio*.

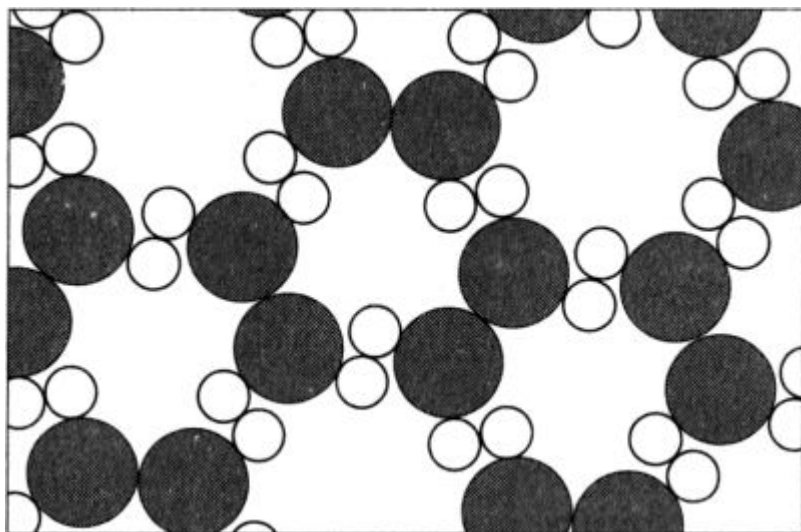


Fig. 4 - Ghiaccio.

Questa raffigurazione schematica del ghiaccio è inesatta perché è in due dimensioni, ma da un punto di vista qualitativo è corretta. La cosa interessante è che in questo materiale ogni atomo ha un suo posto preciso e quindi, dato che tutti gli atomi sono rigidamente collegati, se in qualche modo fissiamo gli atomi in una certa posizione a un'estremità della goccia, automaticamente verrà determinata la disposizione degli atomi all'altra estremità (a chilometri di distanza, in questa scala). Quindi, se teniamo fermo un ghiacciolo a un'estremità, l'altra resisterà al tentativo di spostarlo, a differenza dell'acqua, la cui struttura si disgrega a causa dell'intensificarsi del moto di agitazione, che porta gli atomi a muoversi in ogni direzione. La differenza tra solidi e liquidi, quindi, consiste nel fatto che in un solido gli atomi sono disposti in una configurazione prestabilita, detta *reticolo cristallino*, e atomi a grande distanza gli uni dagli altri non occupano una posizione casuale: la loro posizione, da un lato del cristallo, è determinata da quella di altri atomi, a milioni di atomi di distanza, dall'altro lato. Nella figura 4 vediamo una configurazione immaginaria, la quale, sebbene riproduca alcune caratteristiche reali del ghiaccio, non è quella vera. Una delle caratteristiche rappresentate correttamente è

l'esistenza di una simmetria esagonale. Se ruotiamo la figura di 120° attorno a un asse perpendicolare al foglio, ritorna uguale a se stessa; quindi esiste una simmetria, nel ghiaccio, che rende conto della forma esagonale dei fiocchi di neve. Dalla figura 4 si capisce anche perché il ghiaccio diminuisce di volume quando si scioglie: la struttura cristallina presenta molti «buchi», una caratteristica tipica del ghiaccio, che quando la struttura si frantuma vengono occupati da molecole. Quasi tutte le sostanze semplici, a eccezione dell'acqua e del metallo tipo, *si espandono* quando si sciolgono: nel cristallo solido, infatti, gli atomi sono strettamente stipati, mentre allo stato liquido hanno bisogno di più spazio per muoversi; ma una struttura aperta, come quella dell'acqua, si contrae. Benché il ghiaccio abbia una forma cristallina «rigida», la sua temperatura può variare: il ghiaccio contiene calore, e volendo possiamo cambiarne la quantità. Cos'è il calore nel caso del ghiaccio? Gli atomi non stanno fermi: si agitano e vibrano, e quindi, nonostante la struttura del cristallo sia definita e ordinata, tutti gli atomi vibrano «sul posto». Aumentando la temperatura vibrano con ampiezza sempre maggiore, finché a forza di agitarsi non si scrollano via dalla loro posizione. Questo è il processo che va sotto il nome di *fusion*e. Diminuendo la temperatura la vibrazione diminuisce sempre di più, finché allo zero assoluto diventa minima, *ma non zero*. Questo minimo di moto degli atomi non è sufficiente per fondere alcuna sostanza, con una sola eccezione: l'elio. Nell'elio i moti atomici diminuiscono fino al limite minimo, ma anche allo zero assoluto questo moto è sufficiente per impedirgli di gelare. Perfino allo zero assoluto l'elio non gela, a meno che la pressione sia così forte da schiacciare gli atomi l'uno contro l'altro. Aumentando la pressione si riesce a solidificarlo.

Processi atomici

E questo è quanto, a proposito della descrizione di solidi, liquidi e gas dal punto di vista atomico. Tuttavia l'ipotesi atomica descrive anche i processi, e quindi ora ci soffermiamo a esaminare un certo numero di processi dal punto di vista atomico. Il primo è associato alla superficie dell'acqua. Nella figura 5 immaginiamo che essa sia a contatto con l'aria; come prima vediamo le molecole d'acqua che

costituiscono una massa liquida, ma ora vediamo anche la superficie dell'acqua. Al di sopra della superficie troviamo un certo numero di cose: prima di tutto ci sono molecole d'acqua, come nel caso del vapore. Si tratta del *vapore acqueo*, che troviamo sempre al di sopra dell'acqua liquida. (Tra il vapore acqueo e l'acqua esiste un equilibrio di cui parleremo in seguito). Inoltre troviamo alcune altre molecole: ecco due atomi di ossigeno attaccati insieme per conto loro, a formare una molecola di ossigeno, e due atomi di azoto, anch'essi attaccati in una molecola di azoto. L'aria è costituita quasi interamente di azoto, ossigeno, vapore acqueo e quantità minori di anidride carbonica, argo e altre cose. Quindi al di sopra della superficie dell'acqua c'è l'aria, un gas che contiene una certa quantità di vapore acqueo. Cosa succede in questa figura? Le molecole nell'acqua si muovono in continuazione; ogni tanto una che si trova in superficie viene colpita un po' più forte del solito e viene spinta via.

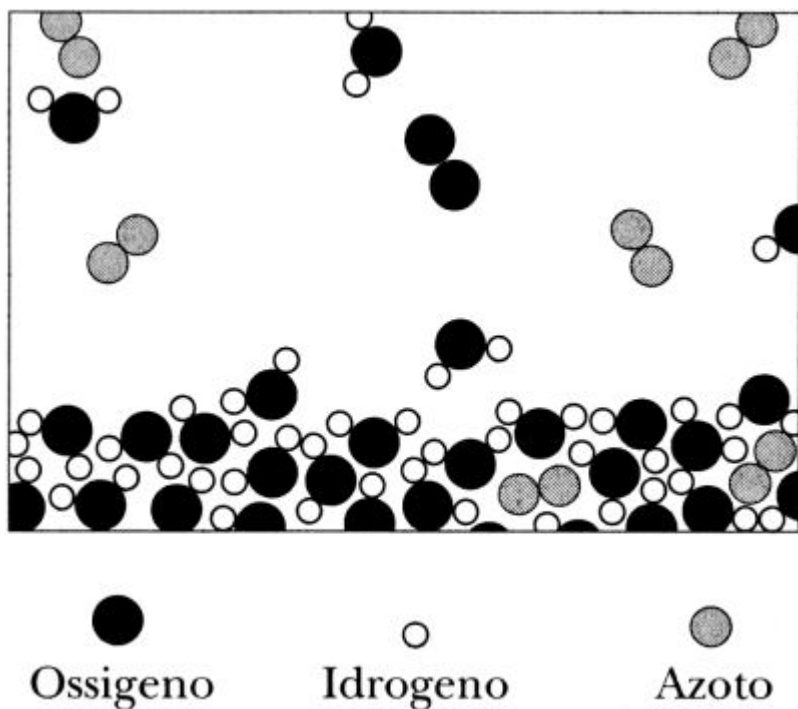


Fig. 5 - Acqua che evapora nell'aria.

Questo è difficile da rappresentare, perché la figura è statica, ma possiamo immaginare che una molecola in superficie sia appena stata colpita e stia volando via. Quindi, una molecola dopo l'altra, l'acqua scompare: evapora. Ma se chiudiamo il contenitore con un coperchio, dopo un po' troveremo un gran numero di molecole d'acqua tra quelle dell'aria. Ogni tanto, una di queste molecole di vapore plana sull'acqua e rimane di nuovo attaccata. Così vediamo che una cosa apparentemente morta e insignificante (un bicchiere d'acqua con un coperchio, che magari è lì da vent'anni) in realtà contiene un interessante fenomeno dinamico che si svolge senza sosta. Ai nostri occhi, così limitati, sembra che niente cambi, ma se potessimo vedere le cose ingrandite un miliardo di volte ci renderemmo conto che dal punto di vista dell'acqua le cose sono in continuo cambiamento: delle molecole lasciano la superficie, altre vi fanno ritorno.

Come mai non ci accorgiamo di nulla? Perché tante molecole se ne vanno quante tornano; alla lunga non succede niente. Se invece togliamo il coperchio e soffiamo via l'aria umida, sostituendola con aria secca, allora il numero di molecole che volano via sarà esattamente lo stesso di prima, perché dipende dall'agitazione dell'acqua, ma il numero di quelle che tornano indietro diminuisce fortemente, perché nell'aria ci sono molte meno molecole d'acqua. Quindi più molecole se ne vanno di quante ritornano, e l'acqua evapora. Perciò, se volete far evaporare dell'acqua accendete il ventilatore! Ecco un'altra cosa: quali molecole se ne vanno? Quando una molecola si allontana ciò è dovuto a un'accidentale sovraccumulazione di energia - quel minimo in più del livello solito che è necessario per vincere l'attrazione delle molecole vicine. Quindi, dato che se ne vanno le molecole con energia maggiore della media, quelle che restano hanno mediamente minor velocità di prima. Così, evaporando, il liquido gradualmente si raffredda. Naturalmente, quando una molecola di vapore si avvicina alla superficie dell'acqua, a un certo punto si manifesta, improvvisamente, una forte attrazione che ne accelera il moto, e ciò si traduce in una produzione di calore. Così le molecole sottraggono calore quando se ne vanno, e lo generano quando tornano. Se l'evaporazione netta è nulla il risultato è anch'esso nullo: la temperatura dell'acqua non cambia. Ma se soffiamo sull'acqua per mantenere una continua preponderanza del numero delle molecole che evaporano, allora l'acqua si raffredda. Perciò, se volete

raffreddare la minestra soffiategci sopra!

Naturalmente i processi appena descritti sono molto più complicati. Non solo l'acqua entra nell'aria, ma anche, di tanto in tanto, qualche molecola di ossigeno o di azoto entrerà nell'acqua «perdendocisi» dentro, avanzando tra le molecole d'acqua. Quindi l'aria si dissolve nell'acqua, che conterrà quindi molecole di ossigeno e azoto, cioè conterrà aria. Se improvvisamente facciamo il vuoto nel recipiente, le molecole d'aria lasceranno l'acqua più rapidamente di quanto vi siano entrate, e in questo processo si formeranno delle bolle. Cosa molto pericolosa per chi fa immersioni subacquee, come forse saprete. Ora passiamo a un altro processo. Nella figura 6 vediamo, dal punto di vista atomico, un solido che si scioglie nell'acqua. Se mettiamo un cristallo di sale nell'acqua cosa accadrà? Il sale è un solido, un cristallo, una struttura organizzata di «atomi di sale». Nella figura 7 troviamo rappresentata la struttura tridimensionale del sale da cucina, il cloruro di sodio. A rigor di termini il cristallo non è fatto di atomi, ma di *ioni*. Uno ione è un atomo che ha qualche elettrone in più, o ne ha perso qualcuno. In un cristallo di sale troviamo ioni di cloro (cioè atomi di cloro con un elettrone in più) e ioni di sodio (atomi di sodio con un elettrone in meno). Nel sale solido gli ioni stanno attaccati l'uno all'altro per via dell'attrazione elettrica, ma quando lo mettiamo nell'acqua scopriamo che a causa dell'attrazione dell'ossigeno negativo e dell'idrogeno positivo sugli ioni, alcuni di essi si liberano. Nella figura 6 vediamo uno ione di cloro che si libera e altri atomi che fluttuano nell'acqua sotto forma di ioni.

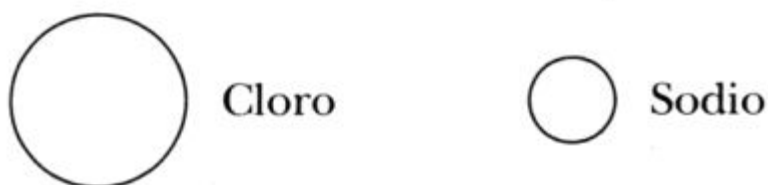
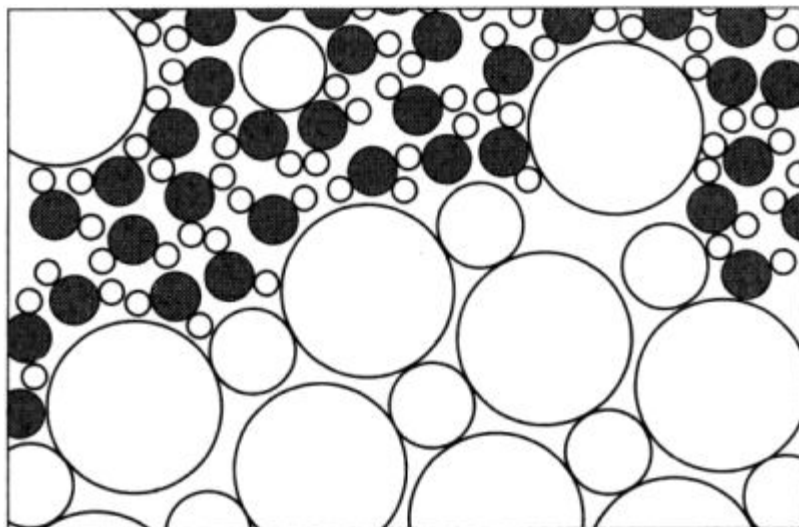


Fig. 6 - Sale che si scioglie nell'acqua.

Questa rappresentazione è abbastanza fedele. Osserviamo, per esempio, che vicino allo ione di cloro sono più frequenti gli estremi di idrogeno delle molecole d'acqua, mentre vicino allo ione di sodio è più probabile trovare l'estremo di ossigeno (infatti il sodio è positivo e l'estremo di ossigeno dell'acqua è negativo, quindi si attraggono elettricamente). Si può capire se la figura rappresenta del sale che si scioglie nell'acqua o non invece del sale che cristallizza dall'acqua? Naturalmente *no*, perché ci sono atomi che si inseriscono nel cristallo mentre altri lo stanno lasciando; il processo è dinamico, come nel caso dell'evaporazione, e dipende dalla quantità di sale nell'acqua: se è maggiore o minore di quella necessaria all'equilibrio.

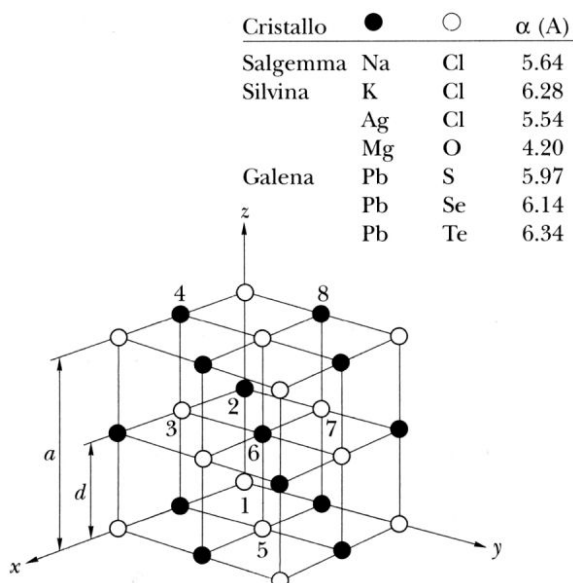


Fig. 7 - Distanza dallo ione contiguo $d = a/2$.

Con la parola «equilibrio» intendiamo la situazione in cui tanti atomi se ne vanno quanti tornano indietro. Se nell'acqua non c'è sale quasi per niente, se ne vanno molti più atomi di quanti tornino, e il sale si scioglie; per contro, se ci sono troppi «atomi di sale», quelli che tornano saranno in numero maggiore e il sale cristallizza.

Incidentalmente, accenniamo al fatto che il concetto di molecola è solo approssimato, ed esiste soltanto per una certa classe di sostanze. Nel caso dell'acqua è chiaro che i tre atomi sono effettivamente attaccati insieme, ma non è così chiaro nel caso del cloruro di sodio allo stato solido. Esiste solo una disposizione degli ioni di sodio e cloro in una configurazione cubica; non c'è alcun modo naturale di raggrupparli sotto forma di «molecole di sale».

Ritornando alla nostra discussione sulla soluzione e la precipitazione, se la temperatura della soluzione aumenta, aumenta la quantità di atomi che lasciano il cristallo, così come aumenta la quantità di quelli che tornano indietro. In generale è molto difficile riuscire a prevedere in quale modo finirà, se il solido si scioglierà in quantità maggiore o minore. La maggior parte delle sostanze si scioglie di più all'aumentare della temperatura, ma alcune si sciolgono di meno.

Reazioni chimiche

In tutti i processi descritti finora atomi e ioni non hanno cambiato compagno, ma naturalmente ci sono circostanze in cui gli atomi si ricombinano diversamente, formando nuove molecole. Ne vediamo un'illustrazione nella figura 8; un processo in cui avviene una ricombinazione di atomi viene chiamato *reazione chimica*. Gli altri processi descritti finora sono processi fisici, ma la distinzione tra i due tipi non è così netta. (La natura non si preoccupa di come chiamiamo le cose, le fa e basta).

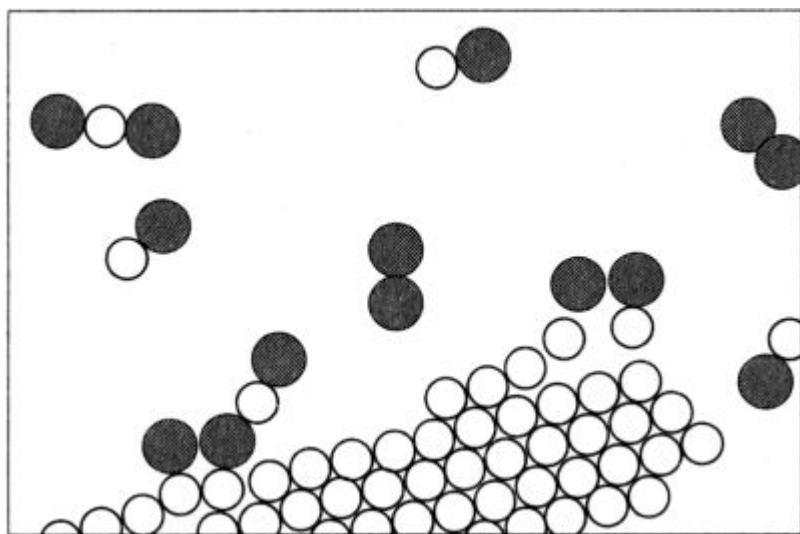


Fig. 8 - Carbonio che brucia nell'ossigeno.

Questa figura dovrebbe rappresentare del carbonio che brucia nell'ossigeno. Nel caso dell'ossigeno, due atomi sono attaccati l'uno all'altro molto strettamente. (Perché due e non tre o quattro? Si tratta di una delle peculiarità di questi processi atomici: gli atomi sono molto speciali; amano certi particolari compagni, certe direzioni, e così via. È compito della fisica analizzare perché a ognuno piace una cosa piuttosto che un'altra. Ad ogni modo, due atomi di ossigeno, saturati e felici, formano una molecola) .

Supponiamo che gli atomi di carbonio siano in forma di cristallo solido, che potrebbe essere grafite o diamante.² Ora, una delle

molecole di ossigeno potrebbe avvicinarsi al carbonio, e ogni atomo magari raccogliere un atomo di carbonio e volare via in una nuova combinazione (carbonio-ossigeno) che è una molecola del gas chiamato ossido di carbonio, nome chimico CO. È molto semplice: la scritta «CO» è praticamente una rappresentazione della molecola. Ma il carbonio attrae l'ossigeno molto più di quanto faccia l'ossigeno con l'ossigeno, o il carbonio con il carbonio. Perciò in questo processo l'ossigeno può magari entrare con poca energia, ma l'ossigeno e il carbonio si attaccheranno insieme con tremenda violenza, causando tumulto, e ogni cosa nelle vicinanze raccoglierà energia. Una gran quantità di energia di moto, energia cinetica, viene così generata. Abbiamo naturalmente descritto una *combustione*: dalla combinazione di ossigeno e carbonio si ottiene calore. Il calore si presenta solitamente sotto forma di moto molecolare del gas riscaldato, ma in certe circostanze può essere così intenso da generare luce. Ecco come si formano le fiamme.

Ma l'ossido di carbonio non è ancora soddisfatto. È possibile che si leghi a un altro ossigeno, così si ha una reazione molto più complicata, in cui l'ossigeno si combina con il carbonio, e allo stesso momento capita una collisione con una molecola di ossido di carbonio. Un atomo di ossigeno si potrebbe unire al CO e formare infine una molecola composta da un carbonio e due ossigeni, indicata con CO_2 e chiamata anidride carbonica. Se bruciamo il carbonio con pochissimo ossigeno in una reazione molto rapida (per esempio nel motore di un'automobile, dove avvengono esplosioni tanto veloci che l'anidride carbonica non si forma per mancanza di tempo) si forma una notevole quantità di ossido di carbonio. In riordinamenti del genere si sprigiona una grande quantità di energia sotto forma di esplosioni, fiamme, ecc., a seconda delle reazioni. I chimici hanno studiato queste disposizioni degli atomi e hanno scoperto che ogni sostanza è un qualche tipo di configurazione di atomi. Per illustrare questa idea, consideriamo un altro esempio. Se passeggiamo in un campo di violette, sappiamo benissimo cosa sia «quel profumo». È un certo tipo di molecola, o configurazione di atomi, che si è fatta strada nel nostro naso. Prima di tutto, come ci è entrata? È piuttosto semplice: se il profumo è un certo tipo di molecola che sta nell'aria, agitandosi e facendosi sbattere di qua e di là, può esserci entrata nel naso per caso. Certamente non aveva nessuna voglia di farlo, si tratta semplicemente di una povera componente indifesa di una folla di molecole in tumulto, e nei suoi

vagabondaggi senza meta questo particolare pezzetto di materia finisce per trovarsi nel nostro naso.

Ora, i chimici possono prendere molecole speciali come il profumo di violetta, analizzarle e dirci l'esatta disposizione degli atomi nello spazio. Sappiamo che l'anidride carbonica è diritta e simmetrica: $O-C-O$. (Anche questo si può determinare facilmente con metodi fisici). Comunque, perfino per le strutture molto più complicate di atomi che si incontrano in chimica si può trovare la disposizione degli atomi, mediante un lungo e notevole lavoro investigativo.

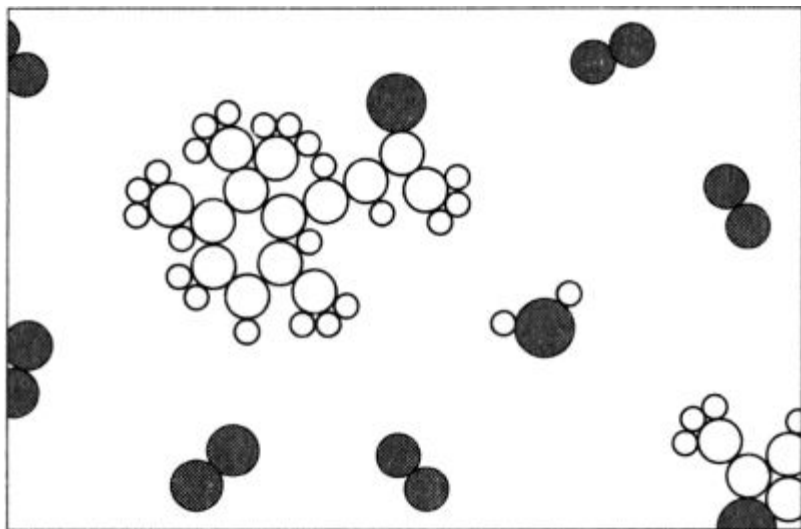


Fig. 9 - Profumo di violetta.

La figura 9 rappresenta l'aria intorno a una violetta; nell'aria troviamo ancora azoto e ossigeno, e vapore acqueo. (Perché vapore acqueo? Perché la violetta è umida, e tutte le piante traspirano). Tuttavia, vediamo anche un «mostro» composto di atomi di carbonio, di idrogeno e di ossigeno, organizzati in una certa struttura particolare. È una configurazione molto più complicata di quella dell'anidride carbonica, in effetti è enormemente complicata. Sfortunatamente non possiamo raffigurare tutto ciò che conosciamo della sua chimica, perché l'esatta disposizione di tutti gli atomi è nota in tre dimensioni, mentre la nostra figura ne ha solo due. I sei atomi di carbonio disposti ad anello non formano un anello piatto, ma una sorta di anello «raggrinzito». Si conoscono tutti gli angoli e

le distanze. Quindi la formula chimica è semplicemente una raffigurazione di questa molecola: quando un chimico scrive una cosa del genere sulla lavagna, sta cercando, grosso modo, di «disegnare» in due dimensioni. Per esempio, vediamo un «anello» di atomi di carbonio, e una «catena» di atomi di carbonio che pende dall'anello, con un ossigeno sul penultimo, tre idrogeni attaccati a quel carbonio, due atomi di carbonio e tre idrogeni attaccati lì, ecc.

Come fa il chimico a capire quale sia la configurazione? Mescola bottiglie piene di roba, e se viene rosso vuol dire che c'è un idrogeno e due carbonii attaccati lì, se viene blu è tutto diverso. Questo è uno dei campi di indagine più fantastici che siano mai stati esplorati: la chimica organica. Per scoprire la configurazione degli atomi in queste strutture enormemente complicate il chimico guarda cosa succede quando mescola due sostanze diverse. I fisici non hanno mai veramente creduto ai chimici che descrivono la configurazione degli atomi, pensando che in realtà non sappiano esattamente di cosa stanno parlando. Da circa vent'anni si possono, in certi casi, guardare queste molecole (non proprio complicate come questa, ma che ne contengono magari delle parti) con metodi fisici, e quindi si può localizzare ciascun atomo non guardando al colore di una miscela, ma misurando dove si trova. E... udite, udite!, i chimici hanno quasi sempre ragione. Risulta infatti che nel profumo di violetta ci sono tre molecole leggermente diverse, che differiscono solo nella disposizione degli atomi di idrogeno.

Uno dei problemi della chimica è dare alle sostanze un nome che faccia capire di che si tratta. Trovate un nome a questa struttura! (Quella di fig. 10).

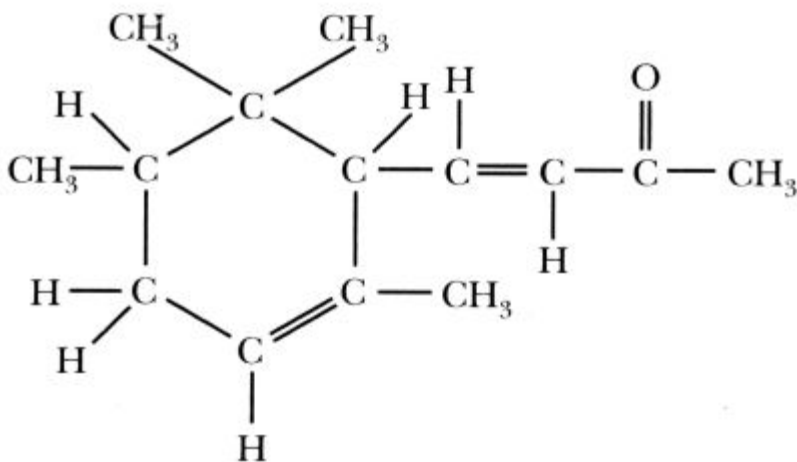


Fig. 10 - La sostanza raffigurata è α -irone.

Non solo il nome deve descrivere la forma della molecola, ma deve anche dirci che qui c'è un atomo di ossigeno, lì uno di idrogeno... Esattamente quali atomi ci sono e dove si trovano. Quindi possiamo ben capire che i nomi chimici debbano essere complicati per essere completi. Il nome di questa cosa nella forma più completa, quella che meglio descrive la struttura, è 4-(2, 2, 3, 6 tetrametile-5-cicloesani)-3-butene-2-one, e questo descrive la configurazione. Possiamo ben capire le difficoltà dei chimici, e anche riconoscere la ragione di questi nomi così lunghi. Non che i chimici si divertano a essere incomprensibili, è che hanno grossi problemi a descrivere le molecole con le parole! Come facciamo a sapere che gli atomi esistono? Usando uno dei trucchi menzionati prima: facciamo l'ipotesi che gli atomi esistano, e uno dopo l'altro i risultati seguono come previsto, come se l'ipotesi fosse esatta. C'è anche una prova più diretta, e quanto segue ne è un buon esempio: gli atomi sono così piccoli che non si possono vedere con un microscopio ottico, e in effetti nemmeno con un microscopio elettronico (con un microscopio ottico si vedono solo cose molto più grandi). Ora, se gli atomi si muovono in continuazione, per esempio nell'acqua, e mettiamo nell'acqua una grossa palla di qualche tipo, molto più grossa degli atomi, la palla si agiterà, in modo analogo a quanto avviene in una partita di palla a spinta, dove una palla grande e grossa viene spinta di qua e di là da due squadre rivali. I giocatori spingono in varie direzioni, e la palla si muove sul campo in modo

irregolare. Qui, allo stesso modo, la «grande palla» si muoverà, da un istante all'altro, a causa dei colpi disuguali ricevuti da una parte e dall'altra. Perciò, osservando particelle minuscole (i colloidi) in sospensione nell'acqua con un microscopio eccellente, le vedremo zigzagare continuamente a causa del bombardamento degli atomi, in quello che è noto come *moto browniano*.

Altre prove dell'esistenza degli atomi si trovano nella struttura dei cristalli. In molti casi le strutture dedotte dall'analisi a raggi X sono in accordo con le forme spaziali dei cristalli quali si trovano in natura. L'angolo tra le facce di un cristallo è esattamente (a meno di qualche secondo di arco) quello dedotto dall'ipotesi che il cristallo sia formato da molti «strati» di atomi. *Tutte le cose sono fatte di atomi*: questa è l'ipotesi chiave. L'ipotesi più importante di tutta la biologia, per esempio, è che quello che fanno gli animali lo fanno gli atomi. In altre parole, non c'è nulla che gli esseri viventi possano fare e che non si possa comprendere partendo dall'ipotesi che siano fatti di atomi interagenti secondo le leggi della fisica. Questo fatto non è noto da sempre: ci vollero molti esperimenti e teorizzazioni per suggerire questa ipotesi, ma ora è accettata, ed è la teoria più utile per dare vita a nuove idee nel campo della biologia.

Se un pezzo di acciaio o di sale, fatti di atomi uno accanto all'altro, possono avere proprietà tanto interessanti; se l'acqua (costituita semplicemente da questi piccoli corpuscoli adagiati per chilometri e chilometri sulla Terra) può formare onde e schiuma, infrangersi con rumore di scroscio e dare vita a strane forme scorrendo sul cemento; se tutto questo, tutta la vita di un rivo d'acqua, può essere nient'altro che una pila di atomi, cos'altro sarà mai possibile? Se invece di sistemare gli atomi in qualche configurazione prestabilita, ripetuta in continuazione, o perfino formare piccoli grumi di complessità come il profumo di violette, creassimo una disposizione sempre diversa da una zona all'altra, con tipi diversi di atomi disposti in molti modi, una disposizione continuamente mutevole, mai ripetuta, in quale altro modo meraviglioso potrà mai comportarsi questa «cosa»? È possibile che la «cosa» che cammina avanti e indietro e vi parla sia una grande massa di questi atomi in una disposizione molto complessa, tanto che la sua pura e semplice complessità sconcerti la mente per le sue possibilità? Quando dico che siamo un ammasso di atomi, non voglio dire che siamo *solo* un ammasso di atomi: perché un ammasso di atomi che non sia in una configurazione ripetuta in modo identico potrebbe benissimo avere

le possibilità che vedete davanti a voi nello specchio.

II

FISICA DI BASE

Introduzione

In questo capitolo esamineremo le idee fondamentali della fisica: la natura delle cose come le vediamo al momento attuale. Non tratteremo la storia dell'evoluzione di queste idee: imparerete questi particolari a tempo debito. Le cose di cui ci occupiamo nella scienza si mostrano in una miriade di forme, e con una moltitudine di attributi. Per esempio, se stiamo sulla spiaggia e guardiamo il mare, vediamo l'acqua, le onde che si infrangono, la schiuma, il movimento agitato dell'acqua, il suono, l'aria, il vento e le nuvole, il sole e il cielo azzurro, la luce; c'è la sabbia, pietre di varia durezza e stabilità, colore e consistenza. Ci sono animali e alghe, fame e malattia, e l'osservatore sulla spiaggia; ci possono essere perfino felicità e pensiero. Qualsiasi altro luogo in natura ha una simile varietà di cose e di influenze. È sempre così complicato, in qualsiasi luogo. La curiosità pretende che ci poniamo delle domande, che cerchiamo di mettere le cose insieme e di capire questa moltitudine di aspetti come il risultato, forse, dell'azione di un numero relativamente piccolo di cose e forze elementari che agiscono in un'infinita varietà di combinazioni.

Per esempio: la sabbia è diversa dalle pietre? Cioè, non è forse la sabbia nient'altro che un gran numero di pietre piccolissime? La Luna non sarà magari una pietra enorme? Se capissimo le pietre, capiremmo anche la sabbia e la Luna? Il vento è un'agitazione dell'aria analoga all'agitazione dell'acqua del mare? Quali caratteristiche hanno in comune questi moti diversi? Cos'hanno in comune suoni diversi? Quanti colori diversi esistono? E così via. In questo modo cerchiamo di analizzare gradualmente tutte le cose, di mettere insieme cose che a prima vista sembrano diverse, con la speranza di poter *ridurre* il numero di cose diverse e quindi capirle meglio. Qualche centinaio di anni fa si scoprì un metodo per trovare risposte parziali a questioni del genere. *Osservazione, ragionamento ed esperimento* costituiscono quello che chiamiamo *metodo scientifico*. Dovremo limitarci alla pura e semplice descrizione della nostra visione di ciò che a volte viene chiamato *fisica fondamentale*, ossia delle idee fondamentali nate dall'applicazione del metodo

scientifico.

Cosa si intende quando si dice che «capiamo» una cosa? Possiamo immaginare che questo complicato apparato di cose in movimento che chiamiamo «mondo» sia simile a una partita di scacchi giocata dagli dèi, di cui noi siamo spettatori. Non conosciamo le regole del gioco; tutto ciò che ci è permesso è guardare la partita. Naturalmente, se guardiamo abbastanza a lungo, alla fine afferreremo alcune regole di base. Le regole del gioco sono ciò che chiamiamo fisica fondamentale. Anche se le conoscessimo tutte, comunque, potremmo non essere in grado di capire perché viene fatta una data mossa, magari perché è troppo complicata, e le nostre menti sono limitate. Se giocate a scacchi saprete che è molto facile impararne le regole, ma è molto difficile, spesso, scegliere la mossa migliore, o capire perché un giocatore faccia una certa mossa. Così è in natura, solo lo è ancora di più; però potremmo, almeno, riuscire a trovare tutte le regole, alla fine. In effetti, ora non le abbiamo tutte. (Ogni tanto succede qualcosa di simile a un arrocco, e ancora non lo capiamo). A prescindere dalla nostra imperfetta conoscenza delle regole, quello che in realtà si può spiegare tramite esse è ben poco, perché in genere le situazioni sono così enormemente complicate che non si riesce, applicando le regole, a seguire le fasi della partita, né tantomeno a prevedere come andrà a finire. Perciò dobbiamo limitarci alla questione di base delle regole del gioco. Se conosciamo le regole, diremo che «capiamo» il mondo. Come facciamo a dire se le regole che «tiriamo a indovinare» siano veramente giuste, visto che non riusciamo ad analizzare a fondo la partita? Ci sono, grosso modo, tre metodi. Primo, ci possono essere situazioni dove la natura è semplice ed è formata (o siamo noi a formarla) da così poche parti che possiamo prevedere esattamente quello che succederà, e controllare come funzionano le nostre regole. (In un angolo della scacchiera magari ci sono solo pochi pezzi, ed è possibile un'analisi esatta della situazione). Un secondo modo è verificare le regole usando sotto-regole meno specifiche. Per esempio, la regola sulla mossa dell'alfiere è che si muove solo in diagonale. Dopo aver osservato molte mosse, si può dedurre che un certo alfiere si trova sempre su una casella bianca. Così, anche senza riuscire a seguire i particolari, possiamo verificare la nostra congettura sugli spostamenti dell'alfiere andando a vedere se si trova sempre su una casella bianca. Naturalmente sarà così, per un bel po' di tempo, finché all'improvviso non lo troviamo su una casella nera.

(naturalmente quello che è successo è che nel frattempo è stato mangiato, un'altra pedina è andata a regina e si è trasformata in un alfiere su una casella nera). Così succede in fisica. Per lungo tempo possiamo avere una regola che funziona in modo eccellente e completo, anche quando non riusciamo a seguire i particolari, e poi a un certo punto ne scopriamo una nuova. Dal punto di vista della fisica di base, i fenomeni più interessanti sono quelli che si verificano nelle situazioni nuove, quando le regole non funzionano, non quelli in cui le regole funzionano! È così che si scoprono nuove regole.

La terza maniera per capire se le nostre idee sono corrette è relativamente grezza, ma probabilmente è la più efficace. Cioè, lo è per grossolane approssimazioni. Magari non riusciamo a dire perché Alekhine muova proprio quel pezzo, magari riusciamo solo confusamente a capire che sta raccogliendo i suoi pezzi attorno al re per proteggerlo, più o meno, dato che è la cosa più sensata da fare in quelle circostanze. Allo stesso modo, spesso riusciamo a capire la natura - più o meno - senza riuscire a vedere cosa fa ogni singolo pezzettino, in termini della nostra comprensione del gioco.

All'inizio i fenomeni della natura furono grossolanamente divisi in classi, come il calore, l'elettricità, la meccanica, il magnetismo, le proprietà delle sostanze, i fenomeni chimici, la luce (ovvero l'ottica), i raggi X, la fisica nucleare, la gravitazione, i fenomeni dei mesoni, ecc. Tuttavia, lo scopo è vedere l'intera natura come aspetti diversi di un unico complesso di fenomeni. Questo è il problema della fisica teorica di base oggi: trovare le leggi dietro all'esperimento, amalgamare queste classi. Storicamente, siamo sempre riusciti ad amalgamarle, ma con il passare del tempo si scoprono sempre cose nuove. Stavamo amalgamando alla grande, quando all'improvviso si scoprirono i raggi X. Allora incorporammo anche quelli, e si scoprirono i mesoni. Quindi, in ogni sua fase la partita sembra sempre piuttosto confusa. Si è raggiunto un alto grado di integrazione, ma ci sono sempre molti fili sospesi in ogni direzione. Questa è la situazione odierna, quella che cercheremo di descrivere. Alcuni esempi storici di integrazione sono i seguenti. Prima, prendiamo il calore e la meccanica. Quando gli atomi sono in movimento, più si muovono più calore contiene il sistema, e quindi il calore e tutti gli effetti della temperatura si possono rappresentare per mezzo delle leggi della meccanica. Un'altra straordinaria fusione fu la scoperta della relazione tra elettricità, magnetismo e luce, che si

rivelarono aspetti diversi della stessa cosa, che oggi chiamiamo *campo elettromagnetico*. Un'altra fusione è l'unificazione dei fenomeni chimici, delle proprietà delle varie sostanze, e del comportamento delle particelle atomiche, unificazione realizzata nella meccanica quantistica della chimica.

La domanda, naturalmente, è: sarà possibile amalgamare *tutto*, e scoprire che questo mondo rappresenta i diversi aspetti di un'unica cosa? Non si sa. Tutto ciò che sappiamo è che andando avanti riusciamo ad amalgamare dei pezzi, e poi troviamo altri pezzi che non si combinano, e continuiamo a cercare di completare il puzzle. Naturalmente non si sa nemmeno se il numero di pezzi sia finito, o se il puzzle abbia una frontiera. Non si saprà finché il quadro non sarà completo, se mai lo sarà. Quello che vogliamo fare qui è vedere fino a che punto è arrivato questo processo di fusione, e quale sia la situazione attuale nella comprensione dei fenomeni di base in termini del minor numero di principi. Per dirla in breve: di che cosa sono fatte le cose, e quanti elementi ci sono?

La fisica prima del 1920

È un po' difficile affrontare subito il modo di vedere della fisica d'oggi, quindi cominceremo con l'esporre come le cose apparivano intorno al 1920, per poi esaminare alcuni aspetti particolari. Prima di quell'anno, la nostra visione del mondo era a un dipresso questa: il «palcoscenico» su cui si muove l'universo è lo spazio tridimensionale della geometria, come lo ha descritto Euclide, e i cambiamenti avvengono in un mezzo chiamato tempo. Gli elementi sul palcoscenico sono particelle, per esempio atomi, che hanno alcune proprietà. Prima di tutto, l'*inerzia*: se una particella è in moto, continua ad andare nella stessa direzione a meno che su di essa non agiscano delle forze. Il secondo elemento, quindi, sono le *forze*, che allora si pensava fossero di due tipi: primo, una forza di interazione enormemente complicata e particolareggiata che mantiene gli atomi in diverse combinazioni, e per esempio determina se il sale si scioglie più o meno velocemente all'aumentare della temperatura. L'altra forza è un'interazione a lungo raggio, un'attrazione dolce e tranquilla che varia inversamente al quadrato

della distanza e si chiama gravitazione. Questa legge era nota e molto semplice. Perché le particelle rimangano in moto in assenza di forze, o perché esista una legge gravitazionale, ovviamente, non si sapeva. Quello che ci interessa qui è dare una descrizione della natura. Da questo punto di vista, quindi, un gas, e a dire il vero *tutta* la materia, non è altro che una miriade di particelle in movimento. Quindi molte delle cose viste sulla riva del mare si possono immediatamente collegare. Primo, la pressione: deriva dalle collisioni degli atomi contro le pareti, o contro qualche altra cosa; il turbine degli atomi, che si muovono tutti, in media, nella stessa direzione, è il vento; i moti casuali interni costituiscono il calore. Ci sono onde di densità: se troppe particelle si sono ammassate in un punto, si sposteranno rapidamente, causando un altro ammasso di particelle poco lontano, che a sua volta ne creerà un altro, e così via. Questa onda di densità è il suono. Riuscire a capire tutto questo è un successo straordinario; alcune di queste cose sono spiegate nel capitolo 1. Quanti tipi di particelle esistono? Allora si pensava ce ne fossero novantadue: tanti infatti erano i tipi diversi di atomi scoperti a quel tempo. Avevano nomi diversi, legati alle loro proprietà chimiche. La parte seguente del problema era: *quali sono le forze, a breve raggio* ? Perché il carbonio attrae un atomo di ossigeno, o forse due, ma non tre? Qual è il meccanismo di interazione tra gli atomi? È la gravità? La risposta è no. La gravità è decisamente troppo debole. Immaginiamo invece una forza simile alla gravità, che varii inversamente al quadrato della distanza, ma enormemente più grande e con una differenza sostanziale: mentre nel caso della gravità tutte le cose si attraggono tra loro, immaginiamo che esistano due classi di «cose», e che questa nuova forza (che è la forza elettrica, naturalmente) abbia la proprietà che gli uguali si respingono e i contrari si attraggono. L'entità che porta questa forte interazione si chiama *carica*.

Dunque, cosa succede? Supponiamo di avere due opposti che si attraggono, un più e un meno, e che stiano molto vicini. Supponiamo anche di avere un'altra carica a una certa distanza: sentirebbe attrazione? Praticamente no, perché se le prime due sono di uguale grandezza, l'attrazione di una e la repulsione dell'altra si equilibrano. A una certa distanza, quindi, la forza è praticamente nulla. Per contro, vicino alla coppia di cariche la terza carica avvertirà una forza *attrattiva*: infatti la repulsione tra gli uguali e l'attrazione dei contrari tende ad avvicinare gli opposti e ad allontanare gli uguali,

sicché la repulsione sarà minore dell'attrazione. Ecco perché gli atomi, che sono costituiti di cariche elettriche positive e negative, percepiscono poca forza quando sono distanti (a parte la gravità). Quando sono vicini, invece, riescono a «vedersi dentro» e a modificare la loro distribuzione di cariche, il che dà luogo a un'interazione molto forte. La base ultima dell'interazione tra gli atomi è elettrica. Dato che la forza è tanto grande, tutti i più e i meno normalmente si riuniranno in una combinazione la più stretta possibile. Tutte le cose, perfino noi stessi, sono fatte di minutissime palline con segno più e meno che interagiscono molto fortemente, tutte perfettamente equilibrate. Ogni tanto, accidentalmente, si possono raschiare via dei più o dei meno (di solito è più facile togliere i meno) e in tali circostanze la forza elettrica non è più equilibrata, e si vedono gli effetti delle attrazioni elettriche.

Per dare un'idea di quanto l'elettricità sia più forte della gravitazione, consideriamo due granelli di sabbia di un millimetro di diametro, a trenta metri di distanza. Se la forza elettrica fra loro non fosse equilibrata, se tutto attraesse tutto e non ci fosse repulsione tra cariche uguali, che forza si osserverebbe? Tre milioni di tonnellate! Vedete bene che basta un piccolissimo eccesso o difetto di carica per produrre effetti elettrici apprezzabili. Questa è la ragione per cui non si vede la differenza tra un oggetto carico elettricamente e uno scarico: la carica riguarda talmente poche particelle da non apportare praticamente alcuna differenza al peso o alle dimensioni di un oggetto.

In questo quadro gli atomi erano più facilmente comprensibili. Si pensava avessero un «nucleo» al centro, carico positivamente e di grande massa, circondato da un certo numero di «elettroni» molto leggeri e carichi negativamente. Ora andiamo un po' più in là nel nostro racconto e osserviamo che nel nucleo stesso furono trovati due tipi diversi di particelle, protoni e neutroni, più o meno della stessa massa e molto pesanti. I protoni hanno carica elettrica e i neutroni no. Se in un atomo ci sono sei protoni nel nucleo, e sei elettroni che lo circondano (le particelle negative nel mondo comune della materia sono tutte elettroni, e sono molto leggere in confronto ai protoni e neutroni del nucleo), vuol dire che è l'atomo numero sei nella tavola chimica, e si chiama carbonio. L'atomo numero otto si chiama ossigeno e così via, perché le proprietà chimiche dipendono dagli elettroni esterni, e in effetti solo da quanti sono. Quindi le proprietà chimiche di una sostanza dipendono solo da un numero, il

numero di elettroni. (La tavola chimica degli elementi potrebbe essere formata da numeri: 1, 2, 3, 4, 5, ecc. Invece di dire «carbonio» diremmo «elemento sei», che significa «sei elettroni». Ma quando si scoprirono i diversi elementi non si sapeva che si potessero numerare in tal modo, e inoltre questo renderebbe tutto abbastanza complicato. È meglio avere nomi e simboli, piuttosto che chiamare tutto per numero). Si scoprì dell'altro riguardo alla forza elettrica. L'interpretazione naturale dell'interazione elettrica è che due oggetti si attraggono: più contro meno. Tuttavia, questa idea non risulta adeguata a rappresentare la situazione. Una rappresentazione più esatta è dire che la presenza della carica positiva, in qualche senso, distorce, o crea una «condizione» tale, nello spazio, che quando una carica negativa si trova in quella zona sente una forza. Questa potenzialità di produrre una forza si chiama *campo elettrico*. Quando mettiamo un elettrone in un campo elettrico, sente una forza. Abbiamo quindi due regole: a) la carica crea un campo, e b) una carica in un campo subisce una forza e si muove. La ragione di questo sarà chiara dopo la discussione del seguente fenomeno. Se carichiamo elettricamente un oggetto, diciamo un pettine, e poniamo poi un pezzo di carta carico a una certa distanza, muovendo il pettine avanti e indietro, la carta risponde orientandosi sempre in direzione del pettine. Agitandolo più in fretta si vede che la carta rimane sempre un po' indietro, cioè c'è un *ritardo* nell'azione. (Nel primo caso, quando il pettine si muove più lentamente, c'è una complicazione dovuta al magnetismo. Le influenze magnetiche hanno a che fare con *cariche in moto relativo*, quindi le forze elettriche e magnetiche si possono attribuire a un unico campo, come due aspetti diversi della stessa cosa. Un campo elettrico variabile non può esistere senza magnetismo). Se spostiamo la carta più lontano, il ritardo aumenta. Allora si osserva una cosa interessante: la forza tra i due oggetti carichi dovrebbe variare come l'inverso del quadrato della distanza, ma quando si muove una carica l'influenza si estende ben più lontano di quanto si potrebbe immaginare a prima vista. Cioè, l'effetto diminuisce più lentamente dell'inverso del quadrato.

Ecco un'analogia: immaginiamo che vicino a noi, in una pozza d'acqua, galleggi un tappo di sughero; muovendo l'acqua lì nei pressi con un secondo tappo, muoveremo «direttamente» il primo tappo. Se ci limitiamo a considerare i due tappi, vedremo soltanto che il primo si muove immediatamente in risposta al moto dell'altro; che

cioè c'è una sorta di interazione tra i due. (In realtà, ovviamente, è l'acqua a muoversi, ed è l'acqua a spostare il tappo galleggiante). Potremmo quindi inventare una «legge»: se si spinge un poco l'acqua, un oggetto che galleggia vicino si muoverà. Se il tappo galleggiante fosse molto lontano, naturalmente, non si muoverebbe quasi per niente, perché noi stiamo perturbando l'acqua *localmente*. Ma se agiamo il nostro tappo, interviene un altro fenomeno, nuovo, in cui l'acqua qui vicino muove l'acqua un po' più in là, ecc., e l'onda viaggia, così che l'influenza dell'agitazione del nostro tappo si estende molto più lontano: è un'influenza oscillatoria, che non si può comprendere in termini di interazione diretta. Perciò l'idea dell'interazione diretta deve essere sostituita dall'esistenza dell'acqua, o, nel caso elettrico, dal *campo elettromagnetico*. Il campo elettromagnetico può manifestarsi in forma di onde: alcune sono luce, altre sono usate nelle trasmissioni radio, ma il nome generale è *onde elettromagnetiche*. Queste onde oscillatorie possono avere diverse frequenze. L'unica cosa che le differenzia l'una dall'altra è la frequenza di oscillazione. Se muoviamo una carica avanti e indietro sempre più rapidamente, e guardiamo al risultato, avremo tutta una serie di diversi tipi di effetti, tutti riconducibili a un solo numero: il numero di oscillazioni al secondo. Il segnale che otteniamo da un comune rilevatore di cavi per localizzare i circuiti nelle pareti di un edificio ha una frequenza di circa 100 cicli al secondo (100 hertz). Se aumentiamo la frequenza a 500 o 1000 chilocicli (1 chilociclo = 1000 cicli) al secondo, siamo «in onda»: infatti questa è la frequenza usata per le trasmissioni radio AM. Se aumentiamo ancora la frequenza, entriamo nella banda utilizzata per le trasmissioni in modulazione di frequenza e televisive. Andando ancora oltre incontriamo certe onde corte usate, per esempio, per il radar. Ancora più in là non abbiamo più bisogno di strumenti per «vedere» il fenomeno, perché lo vediamo coi nostri occhi. Nella banda compresa tra 5×10^{14} e 5×10^{13} cicli al secondo i nostri occhi vedrebbero l'oscillazione del pettine carico (se riuscissimo a muoverlo così velocemente) come luce rossa, azzurra o violetta, a seconda della frequenza. Le frequenze al di sotto di questo intervallo sono infrarossi, e quelle al di sopra ultravioletti. Il fatto che questo particolare intervallo dello spettro elettromagnetico sia visibile non lo rende più interessante per un fisico, ma naturalmente dal punto di vista umano lo è. Se aumentiamo ancora la frequenza arriviamo ai raggi X, che non sono altro che luce ad alta frequenza.

Ancora più in alto abbiamo i raggi gamma. Questi due termini, raggi X e raggi gamma, vengono usati quasi indifferentemente. Di solito i raggi elettromagnetici provenienti dal nucleo si chiamano raggi gamma, mentre quelli ad alta energia che vengono dagli atomi si chiamano raggi X, ma alla stessa frequenza non si possono distinguere fisicamente, quale che sia la loro origine. Se andiamo a frequenze ancora più alte, per esempio 10^{24} cicli al secondo, risulta possibile produrre queste onde artificialmente, per esempio con il sincrotrone che c'è qui al Caltech. Troviamo onde elettromagnetiche di frequenza prodigiosamente alta, fino a mille volte più alta di quelle prodotte dal sincrotrone, nei raggi cosmici. Queste onde sfuggono al nostro controllo.

Un quadro riassuntivo è riportato nella seguente tabella.

Tab. 1 - Lo spettro elettromagnetico

Frequenza (cicli/secondo)	Nome	Comportamento approssimativo
10^2	Perturbazioni elettriche	Campo
$5 \times 10^5 - 10^6$	Trasmissione radio	Onde
10^8	FM-TV	
10^{10}	Radar	
$5 \times 10^{14} - 10^{15}$	Luce	
10^{18}	Raggi X	Particelle
10^{21}	Raggi γ nucleari	
10^{24}	Raggi γ « artificiali »	
10^{27}	Raggi γ nei raggi cosmici	

Fisica quantistica

Ora che abbiamo descritto l'idea del campo elettromagnetico, e come tale campo possa manifestarsi in forma di onde, scopriamo subito

che queste onde in realtà si comportano in uno strano modo, e non sembrano onde per niente. Ad alte frequenze si comportano molto più come particelle! È la meccanica quantistica, scoperta dopo il 1920, che spiega questo strano comportamento. In precedenza Einstein aveva cambiato la rappresentazione dello spazio come tridimensionale, con il tempo come cosa a sé e diversa, prima in una combinazione chiamata spazio-tempo, e poi nello spazio-tempo curvo per rappresentare la gravitazione. Il «palcoscenico» si era così trasformato nello spazio-tempo, del quale la gravitazione è presumibilmente una modificazione. Poi si scoprì che neppure le leggi del moto delle particelle erano corrette. Le regole meccaniche dell'inerzia e della forza sono sbagliate (sì, avete capito bene, le leggi di Newton sono *sbagliate*) nel mondo degli atomi. Si scoprì che le cose, in scala così piccola, funzionano in modo del tutto diverso che su larga scala. Ecco cosa rende la fisica così difficile, e così interessante. È difficile perché il comportamento in piccola scala è «innaturale»; non ne abbiamo esperienza diretta. Qui le cose si comportano diversamente da tutto ciò che conosciamo, sicché è impossibile descriverne il comportamento se non per via analitica. È difficile, e ci vuole fantasia. La meccanica quantistica ha molti aspetti. In primo luogo, bisogna abbandonare l'idea che una particella abbia una posizione e una velocità ben definite: è un'idea sbagliata. Per dare un esempio di quanto sia sbagliata la fisica classica, esiste una regola in meccanica quantistica secondo la quale non si può sapere dove si trova una cosa e al tempo stesso quale sia la sua velocità. L'indeterminazione della quantità di moto e quella della posizione sono complementari, e il prodotto delle due è costante. Possiamo scrivere la legge così: $\Delta x \Delta p \geq h/2\pi$, ma la spiegheremo con maggior precisione più avanti. Questa regola è la spiegazione di un paradosso molto misterioso: se gli atomi sono fatti di cariche positive e negative, perché le cariche negative non cadono su quelle positive (dopotutto si attraggono) e non le annullano? *Perché gli atomi sono così grandi* ? Perché il nucleo sta in mezzo con gli elettroni intorno? Prima si pensava perché è grande, ma non è vero. Il nucleo è molto piccolo. Il diametro di un atomo è circa 10^{-8} cm, e quello del nucleo è circa 10^{-13} cm. Se avessimo un atomo e volessimo vederne il nucleo, dovremmo ingrandirlo fino alle dimensioni di una stanza, e allora il nucleo sarebbe una briciolina che si distingue a malapena, eppure quasi tutto il peso dell'atomo è in quel nucleo infinitesimo. Che cosa impedisce agli elettroni di

cascarci sopra? Questo principio: se fossero nel nucleo, sapremmo con precisione dove si trovano, e il principio di indeterminazione richiederebbe allora una grande (ancorché indeterminata) quantità di moto, cioè una grandissima energia cinetica. Con questa energia si staccerebbero dal nucleo. Allora giungono a un compromesso: si lasciano un po' di «gioco» per questa indeterminazione e oscillano con un minimo di moto in accordo con questa regola. (Ricordate quando abbiamo detto che anche se un cristallo viene raffreddato fino allo zero assoluto, gli atomi non si fermano, ma continuano ad agitarsi un po'? Se smettersero di muoversi, conosceremmo sia la loro posizione sia la loro velocità - che è zero -, e questo è contrario al principio di indeterminazione. Non possiamo sapere esattamente dove sono e come si muovono, quindi devono continuare a muoversi!). Un altro cambiamento interessantissimo nelle idee e nella filosofia della scienza dovuto alla meccanica quantistica è il seguente: non è possibile prevedere *esattamente* cosa succederà in ogni circostanza. Per esempio, si può predisporre un atomo a emettere luce, e poi misurare quando l'ha emessa raccogliendo un fotone, particella che descriveremo tra breve. Però non possiamo prevedere *quando* emetterà luce, o avendo diversi atomi, *quale* atomo la emetterà. Si potrebbe sostenere che ciò è dovuto a certi «meccanismi» interni che non abbiamo avuto ancora modo di osservare a sufficienza. Ma non è così. Non ci sono «meccanismi» interni. La natura, così come oggi siamo in grado di capirla, si comporta in modo tale che risulta fundamentalmente impossibile prevedere esattamente cosa succederà in un dato esperimento. È una cosa orribile. Infatti i filosofi avevano stabilito come uno dei requisiti fondamentali della scienza che nelle stesse condizioni debba verificarsi la stessa cosa. Questo è semplicemente *falso*: non si tratta di una condizione fondamentale della scienza. Il fatto è che non succede la stessa cosa, e possiamo trovare solo una media dei risultati, con metodi statistici. Ciò nonostante, la scienza non è completamente crollata. Tra l'altro, i filosofi dicono un sacco di cose su cosa sia *assolutamente necessario* per la scienza, ed è sempre (per quello che si può vedere) piuttosto ingenuo, e probabilmente sbagliato. Per esempio, qualche filosofo ha affermato che è fondamentale per l'impresa scientifica che se un esperimento si svolge, poniamo, a Stoccolma, e poi a Quito, i risultati siano gli stessi. Questo non è vero. Non è obbligatorio nella scienza, può essere un dato di fatto dell'esperienza, ma non è necessario che lo

sia. Per esempio, se uno degli esperimenti è guardare il cielo per vedere l'aurora boreale a Stoccolma, non la vedremo certo a Quito. «Ma» direte voi «quella è una cosa che ha a che fare con l'esterno; ci si può rinchiudere in una stanza, tirare le tendine e trovare una differenza?». Certamente. Se prendiamo un pendolo su un giunto cardanico, lo tiriamo su e poi lo lasciamo andare, oscillerà quasi in un piano, ma non esattamente. Il piano cambia in continuazione a Stoccolma, ma non a Quito. Eppure le tendine sono abbassate. Questo fatto non porta alla distruzione della scienza. Qual è allora l'ipotesi di base della scienza, la sua filosofia fondamentale? L'abbiamo detto nel primo capitolo: *l'unica verifica della validità di un'idea è l'esperimento*. Se viene fuori che quasi tutti gli esperimenti funzionano allo stesso modo a Quito e a Stoccolma, allora quei «quasi tutti» esperimenti verranno usati per formulare una legge generale, e quelli che danno risultati diversi in posti diversi diremo che sono influenzati dall'ambiente di Stoccolma. Inventeremo qualche modo di riassumere i risultati dell'esperimento, e non c'è bisogno di sapere in anticipo quale sarà questo modo. Se ci dicono che lo stesso esperimento produce sempre lo stesso risultato, siamo tutti contenti, ma se quando proviamo a farlo vediamo che non è così, non è così e basta. Bisogna prendere quello che viene, e poi formulare il resto delle nostre idee in funzione dell'esperienza effettiva.

Per tornare alla meccanica quantistica e alla fisica fondamentale, naturalmente non possiamo, per ora, entrare nei sottili dettagli dei principi quantistici. Accettiamo che ci siano, e procediamo a descriverne qualche conseguenza. Una è che certe cose, da sempre considerate onde, si comportano anche come particelle, e che le particelle si comportano come onde; infatti tutte le cose si comportano allo stesso modo. Non c'è distinzione tra onda e particella. Quindi la meccanica quantistica *unifica* l'idea del campo, e delle sue onde, e l'idea delle particelle. Ora, è pur vero che alle basse frequenze l'aspetto di campo del fenomeno è più evidente, o più utile come descrizione approssimata in termini di esperienza quotidiana. Ma, con l'aumentare della frequenza, emergono via via gli aspetti particellari, con gli strumenti di misura a nostra disposizione. Infatti, benché abbiamo menzionato molte frequenze, non si è ancora scoperto un fenomeno che coinvolga direttamente una frequenza maggiore di circa 10^{12} cicli al secondo. Possiamo solo dedurre le frequenze più alte dall'energia delle particelle, con una

regola che assume l'idea di onda-particella della meccanica quantistica. Quindi abbiamo una nuova visione dell'interazione elettromagnetica. Abbiamo un nuovo tipo di particella da aggiungere all'elettrone, al protone e al neutrone. La nuova particella si chiama *fotone*. La nuova visione dell'interazione di elettroni e protoni che è la teoria elettromagnetica corretta tenendo conto della meccanica quantistica si chiama *elettrodinamica quantistica*. La teoria fondamentale dell'interazione di luce e materia, ovvero campo elettrico e cariche, è il nostro maggior successo in fisica fino a oggi. In quest'unica teoria abbiamo le regole di base per tutti i fenomeni normali, a eccezione della gravitazione e dei processi nucleari. Per esempio, dall'elettrodinamica quantistica vengono tutte le leggi elettriche, meccaniche e chimiche: le leggi che governano gli urti di palle da biliardo, il moto di spire percorse da corrente nel campo magnetico, il calore specifico dell'ossido di carbonio, il colore delle insegne al neon, la densità del sale, le reazioni di idrogeno e ossigeno per formare l'acqua, sono tutte conseguenze di quest'unica legge. Tutti questi particolari si possono elaborare se la situazione è abbastanza semplice da poter fare un'approssimazione; non capita quasi mai che si possa fare un calcolo preciso, ma spesso riusciamo a capire più o meno cosa succede. Oggi come oggi non si conoscono eccezioni alle leggi dell'elettrodinamica quantistica al di fuori del nucleo, e dentro non sappiamo se ci siano eccezioni semplicemente perché non abbiamo idea di cosa succeda all'interno del nucleo. In linea di principio, allora, l'elettrodinamica quantistica è la teoria dell'intera chimica, e della vita, se la vita si riduce in definitiva alla chimica - e quindi alla fisica, perché la chimica già è ridotta alla fisica (infatti la parte della fisica coinvolta nella chimica è già nota). Inoltre, la stessa elettrodinamica quantistica, questa cosa meravigliosa, consente di prevedere molte cose. In primo luogo ci dice le proprietà di fotoni ad altissima energia, raggi gamma, ecc. E poi prevede un'altra cosa notevole: oltre all'elettrone, ci dovrebbe essere un'altra particella con la stessa massa ma carica opposta, chiamata *positrone*, e queste due, unendosi, potrebbero annichilarsi emettendo luce o raggi gamma. (Dopotutto, la luce e i raggi gamma sono la stessa cosa, sono solo punti diversi su una scala di frequenza). La generalizzazione di questo fatto risulta essere vera: per ogni particella esiste un'antiparticella. Nel caso degli elettroni l'antiparticella ha un suo nome proprio, ma per quasi tutte le altre si chiama anti-questo e anti-quello, tipo antiprotone e antineutrone.

Nell'elettrodinamica quantistica si introducono *due numeri*, e si suppone che da essi derivi la maggior parte degli altri numeri del mondo. I due numeri sono la massa e la carica dell'elettrone. A dir la verità non è proprio così, perché abbiamo anche i numeri che, in chimica, ci dicono quanto pesano i nuclei. Questo ci porta al prossimo paragrafo.

Nuclei e particelle

Di cosa sono fatti i nuclei, e che cosa li tiene insieme? Si è scoperto che sono tenuti insieme da forze spaventose. Quando vengono liberate, l'energia sprigionata è enorme a confronto dell'energia chimica: la proporzione è la stessa che c'è tra l'esplosione della bomba atomica e quella del tritolo, perché, naturalmente, l'esplosione atomica ha a che fare con trasformazioni interne al nucleo, mentre quella del tritolo riguarda trasformazioni degli elettroni all'esterno degli atomi. Il problema è: quali forze tengono insieme i neutroni e i protoni nel nucleo? Proprio come l'interazione elettrica si può collegare a una particella, il fotone, così anche le forze tra neutroni e protoni - suggerì Yukawa - potrebbero avere un campo di qualche tipo, e tale campo, in certe condizioni, potrebbe comportarsi come una particella. Quindi potrebbero esserci altre particelle oltre ai protoni e ai neutroni, e Yukawa riuscì a dedurne le proprietà dalle caratteristiche già note delle forze nucleari. Per esempio, calcolò che la loro massa doveva essere circa due o trecento volte la massa dell'elettrone, e (udite, udite!) nei raggi cosmici si sono trovate particelle di quella massa! Ma più tardi si scoprì che non erano le particelle giuste; vennero chiamate mesoni μ , o muoni. Comunque, poco più tardi, nel 1947 o 1948, si scoprì un'altra particella, il mesone π , o pione, che aveva proprio le caratteristiche indicate da Yukawa. Quindi, per avere le forze nucleari bisogna aggiungere al protone e al neutrone anche il pione. Ora direte: «Benissimo! Con questa teoria facciamo della nucleodinamica quantistica usando i pioni proprio come diceva Yukawa, vediamo se funziona e tutto sarà chiaro». Nossignori. I calcoli, in questa teoria, sono talmente complicati che nessuno è mai riuscito a scoprire quali siano tutte le conseguenze della teoria stessa, e quindi a verificarla

con esperimenti, e questa situazione dura da vent'anni! Quindi ci siamo arenati con una teoria, senza sapere se sia giusta o sbagliata, ma sappiamo che è *almeno un po'* sbagliata, o perlomeno incompleta. Mentre noi ci gingillavamo con la teoria, cercando di calcolare le sue conseguenze, i fisici sperimentali hanno scoperto alcune cose. Per esempio, hanno scoperto il muone, e noi non sappiamo ancora quale sia il suo posto nella teoria. Inoltre, nei raggi cosmici si sono trovate particelle «in più» in gran numero. A tutt'oggi se ne contano una trentina, ed è molto difficile capire le relazioni fra tutte loro, e cosa se ne fa la natura di tante particelle, e come sono collegate. Non riusciamo a spiegare queste particelle come aspetti diversi della stessa cosa, e il fatto che ce ne siano tante, tutte scollegate, è una riprova del fatto che abbiamo molte informazioni sconnesse, senza una teoria valida. A fronte dei grandi successi dell'elettrodinamica quantistica, le nostre conoscenze di fisica nucleare sono ancora, per certi versi, allo stato grezzo, qualcosa che è per metà esperienza e per metà teoria: si ipotizza una qualche forza tra protoni e neutroni e si guarda cosa succede, senza realmente capire l'origine della forza stessa. A parte questo, abbiamo fatto ben pochi progressi. Nel caso della chimica, dopo che avevamo raccolto un gran numero di elementi, ci apparve all'improvviso una relazione inaspettata tra essi, incarnata dalla tavola di Mendeleev. Per esempio, il sodio e il potassio hanno quasi le stesse proprietà chimiche, e si trovano nella stessa colonna. Abbiamo cercato una tavola tipo quella di Mendeleev anche per le nuove particelle; ne vennero fuori due, scoperte indipendentemente da Gell-Mann negli Stati Uniti e da Nishijima in Giappone. La base della loro classificazione è un nuovo numero che, come la carica elettrica, si può assegnare a ogni particella e si chiama *stranezza*, indicata con *S*. Questo numero si conserva, come la carica elettrica, nelle reazioni che avvengono tramite forze nucleari.

Nella tabella 2 sono elencate tutte le particelle. Non possiamo discuterne più di tanto, al momento, ma la tabella ci mostra perlomeno quante cose non sappiamo. Sotto ogni particella troviamo la sua massa, espressa in una certa unità di misura chiamata MeV (megaelettronvolt); un MeV è pari a $1,782 \times 10^{-27}$ grammi. La ragione di questa scelta per l'unità di misura è storica, e non ce ne occuperemo ora.

Massa (GeV)	Carica			Stranezza	
	$-e$	0	$+e$		
1.4 -	<u>$Y_1^- \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-$</u>	<u>$Y_1^0 \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0$</u>	<u>$Y_1^+ \rightarrow \Lambda^0 + \pi^+$</u>	$S = 2$	Barioni
1.3 -	<u>Ξ^-</u> 1319	<u>Ξ^0</u> 1311		$S = 2$	
1.2 -	<u>Σ^-</u> 1196	<u>Σ^0</u> 1191	<u>Σ^+</u> 1189	$S = 1$	
1.1 -		<u>Λ^0</u> 1115		$S = 1$	
1.0 -		<u>n</u> 939	<u>p</u> 938	$S = 0$	
0.9 -					
0.8 -		<u>$\omega^0 \rightarrow \pi + \pi + \pi$</u>		$S = 0$	Mesoni
0.7 -	<u>$\rho^- \rightarrow \pi + \pi$</u>	<u>$\rho^0 \rightarrow \pi + \pi$</u>	<u>$\rho^+ \rightarrow \pi + \pi$</u>	$S = 0$	
0.6 -					
0.5 -	<u>K^-</u> 494	<u>$K^0 \bar{K}^0$</u> 498	<u>K^+</u> 494	$S = \begin{matrix} -1 \\ +1 \end{matrix}$	
0.4 -					
0.3 -					
0.2 -	<u>π^-</u> 139.6	<u>π^0</u> 135.0	<u>π^+</u> 139.6	$S = 0$	Leptoni
0.1 -	<u>μ^-</u> 105.6				
0.0 -	<u>e^-</u> 0.51	<u>γ^0</u> 0			

Le particelle più pesanti sono più in alto nella tabella, e, come si vede, il neutrone e il protone hanno praticamente la stessa massa. Nelle colonne troviamo particelle di uguale carica elettrica: gli oggetti neutri nella colonna di mezzo, quelli carichi positivamente nella colonna di destra, e quelli carichi negativamente nella colonna di sinistra. Le particelle sono sottolineate con una linea continua, le «risonanze» con una tratteggiata. Dalla tabella sono state omesse

molte particelle, e tra queste, il fotone e il gravitone, importanti particelle di massa e carica nulla che non rientrano nello schema di classificazione barione - mesone - leptone, e alcune delle risonanze scoperte più recentemente (K^* , ϕ , η). Vengono riportate le antiparticelle dei mesoni, non quelle di leptoni e barioni, che vanno messe in un'altra tabella, uguale a questa, solo ribaltata rispetto alla colonna di carica o. Tutte queste particelle, eccetto l'elettrone, il neutrino, il fotone, il gravitone e il protone, sono instabili, ma i prodotti di decadimento sono indicati esplicitamente solo per le risonanze. Ai leptoni non si può assegnare un valore di stranezza perché non interagiscono fortemente con i nuclei.

Le particelle elencate insieme ai neutroni e ai protoni si chiamano *barioni*, e sono le seguenti: Λ , di massa 1154 MeV, e altre tre, chiamate Σ^+ , Σ^0 e Σ^- , di massa quasi identica. Ci sono gruppi, o multipletti, con quasi la stessa massa, a meno dell'1 o 2 per cento. Tutte le particelle di un multipletto hanno la medesima stranezza. Il primo multipletto è il doppietto protone-neutrone, poi c'è un singoletto (Λ), quindi il tripletto Σ e infine il doppietto Ξ . Molto recentemente, nel 1961, sono state scoperte altre particelle. Ma sono particelle? Vivono per così breve tempo, disintegrandosi quasi istantaneamente, appena formate, che non sappiamo nemmeno se considerarle nuove particelle, o interazioni di «risonanza» di una certa energia tra i prodotti Λ e π in cui si disintegrano.

Oltre ai barioni, le altre particelle interessate all'interazione nucleare si chiamano *mesoni*. Prima ci sono i pioni, che si presentano in tre varietà: pione positivo, negativo e neutro; insieme formano un altro multipletto. Abbiamo anche scoperto delle cose nuove chiamate mesoni K, che si presentano sotto forma di un doppietto K^+ e K^0 . Inoltre, ogni particella ha la sua antiparticella, a meno che non sia l'antiparticella di se stessa. Per esempio, π^+ e π^- sono antiparticelle l'una dell'altra, ma π^0 è l'antiparticella di se stessa. K^+ e K^- sono

antiparticelle l'una dell'altra, così come K^0 e $\bar{K}^0$. Nel 1961 trovammo anche altri mesoni, o meglio, *probabili* mesoni che si disintegrano quasi immediatamente: una cosa chiamata ω che decade in tre pioni e ha massa 780 (in questa scala) e, seppure un po' meno sicuro, un oggetto che decade in due pioni. Nella tabella figurano i mesoni, i barioni e le antiparticelle dei mesoni; le antiparticelle dei barioni vanno messe in un'altra tabella, speculare

rispetto a questa. La tavola di Mendeleev era ottima, a parte un certo numero di elementi appartenenti alle terre rare che non vi trovavano posto; allo stesso modo abbiamo un certo numero di cose che restano fuori da questa tabella: particelle che non interagiscono fortemente nei nuclei, non hanno a che fare con interazioni nucleari, e non hanno una forte interazione (voglio dire, il tipo forte d'interazione dell'energia nucleare). Si chiamano *leptoni*, e sono le seguenti. Abbiamo l'elettrone, che in questa scala ha massa piccolissima, solo 0,510 MeV; poi c'è quell'altra, il mesone μ , detto anche muone, che ha massa molto maggiore, 206 volte quella dell'elettrone. Per quanto ne sappiamo in base agli esperimenti fatti finora, l'unica differenza tra l'elettrone e il muone è la massa. Tutto il resto funziona esattamente alla stessa maniera. Ma perché uno è più pesante dell'altro? A cosa serve? Non si sa. C'è poi un leptone neutro, chiamato *neutrino*, di massa zero. In effetti, ora sappiamo che esistono due tipi di neutrini, uno legato agli elettroni e l'altro ai muoni. Infine abbiamo altre due particelle che non interagiscono fortemente con quelle nucleari: una è il fotone, e forse, se anche il campo gravitazionale ha un analogo nella meccanica quantistica (una teoria quantistica della gravitazione non è ancora stata elaborata), ci sarà un'altra particella, il *gravitone*, di massa zero. Che cos'è questa «massa zero»? Le masse qui indicate sono quelle delle particelle a riposo. Il fatto che una particella abbia massa zero significa, in un certo senso, che non può stare a riposo. Un fotone non è mai fermo: si muove sempre a trecentomila chilometri al secondo. Capiremo meglio il significato della massa quando conosceremo la teoria della relatività, il che avverrà a tempo debito. Così ci troviamo con un gran numero di particelle che nel loro insieme sembrano i costituenti fondamentali della materia. Fortunatamente non sono tutte diverse, nelle loro reciproche interazioni. A quanto pare, ci sono solo *quattro* tipi di interazione: in ordine di intensità decrescente, abbiamo la forza nucleare, le interazioni elettriche, l'interazione del decadimento beta e la gravità. Il fotone si accoppia a tutte le particelle cariche e la forza dell'interazione si misura tramite un certo numero, che è $1/137$. Si conosce nei dettagli la legge che governa questo accoppiamento: si tratta dell'elettrodinamica quantistica. La gravità si accoppia a ogni tipo di energia, ma l'accoppiamento è estremamente debole, molto più debole che nel caso dell'elettricità. Anche questa legge è nota. Poi ci sono i cosiddetti decadimenti deboli: il decadimento beta, per

esempio, che causa la disintegrazione relativamente lenta del neutrone in un protone, un elettrone e un neutrino. I dettagli di questa legge sono noti solo in parte. La cosiddetta interazione forte, l'interazione mesone-barione, ha forza 1 in questa scala, e la legge che la governa è completamente sconosciuta, anche se ci sono un certo numero di regole note, come quella che il numero di barioni in ogni reazione non cambia. Questa è dunque la terribile condizione in cui si trova la fisica di oggi. Per riassumerla, direi questo: al di fuori del nucleo sappiamo tutto, dentro vale la meccanica quantistica (non si sono scoperte violazioni ai principi della meccanica quantistica). Tutta la nostra conoscenza sta sul palcoscenico dello spazio-tempo relativistico; forse la gravità è coinvolta nello spazio-tempo.

Tab. 3 Interazioni elementari

<i>Accoppiamento</i>	<i>Forza*</i>	<i>Legge</i>
Fotone con particelle cariche	$\sim 10^{-2}$	conosciuta
Gravità con ogni tipo di energia	$\sim 10^{-40}$	conosciuta
Decadimenti deboli	$\sim 10^{-5}$	parzialmente nota
Mesoni con barioni	~ 1	sconosciuta (note alcune regole)

* La «forza» è una misura adimensionale della costante di accoppiamento relativa a ciascuna interazione (il segno $\sim$ significa «approssimativamente»).

Non sappiamo come sia iniziato l'universo, né abbiamo mai fatto esperimenti che verifichino accuratamente i nostri concetti di spazio e di tempo al di sotto di una certa distanza minima; quindi sappiamo solo che queste idee funzionano al di sopra di quella distanza. Dovremmo anche aggiungere che le regole del gioco sono i principi della meccanica quantistica, i quali si applicano alle nuove particelle così come alle vecchie, per quanto si può dire. L'origine delle forze nei nuclei ci porta a considerare nuove particelle; sfortunatamente ne troviamo a profusione e non riusciamo a capire completamente i rapporti tra loro, pur sapendo che in certi casi sono veramente sorprendenti. A poco a poco, procedendo a tentoni, avanziamo nella

comprensione delle particelle subatomiche, ma non sappiamo nemmeno a che punto siamo di questa impresa.

III

LA RELAZIONE TRA LA FISICA E LE ALTRE SCIENZE

Introduzione

La fisica è, fra le scienze, la più fondamentale e completa, e ha avuto una profonda influenza su tutto lo sviluppo scientifico. Infatti la fisica è l'equivalente odierno di ciò che un tempo si chiamava filosofia naturale, da cui sono nate quasi tutte le scienze moderne. Studenti delle discipline più diverse si ritrovano a doverla studiare, a causa dell'importanza che riveste in tutti i fenomeni. In questo capitolo cercheremo di descrivere i problemi principali nelle altre scienze, ma naturalmente è impossibile in così breve spazio trattare adeguatamente le questioni complesse, sottili ed eleganti che sorgono in questi campi. La mancanza di spazio ci impedisce anche di descrivere il rapporto tra la fisica e l'ingegneria, l'industria, la società, la guerra, e perfino la relazione, veramente notevole, tra fisica e matematica. (La matematica non è una scienza, dal nostro punto di vista, nel senso che non è una scienza *naturale*. La verifica della sua validità non è l'esperimento). Fra l'altro, dobbiamo chiarire fin dall'inizio che se una cosa non è una scienza, non necessariamente è un male. Per esempio, l'amore non è una scienza. Quindi, se diciamo che qualcosa non è una scienza, non vuol dire che, in essa, c'è qualcosa che non va: vuol dire solo che non è una scienza.

Chimica

La scienza forse più profondamente influenzata dalla fisica è la chimica. Storicamente, ai suoi albori la chimica si interessava quasi esclusivamente dei fenomeni che ora ascriviamo alla chimica inorganica, cioè quella che tratta le sostanze non legate alla vita. Fu necessario un notevole lavoro di analisi per scoprire l'esistenza dei vari elementi e le loro relazioni: come si uniscono a formare i composti relativamente semplici nelle rocce, nella terra, ecc. Questa chimica «primordiale» fu molto importante per la fisica.

L'interazione tra le due scienze fu grandissima, perché la teoria atomica fu convalidata in gran misura da esperimenti di chimica. La teoria della chimica, cioè delle reazioni vere e proprie, venne in gran parte riassunta dalla tavola periodica di Mendeleev, che rivela molte relazioni strane fra i vari elementi, e la chimica inorganica è costituita proprio dalla raccolta delle leggi che dicono quali sostanze si combinano con quali altre, e come. Tutte queste regole in definitiva sono state spiegate dalla meccanica quantistica, così che la chimica teorica è in effetti fisica. D'altra parte, bisogna sottolineare che questa spiegazione esiste solo in linea di principio: abbiamo già detto della differenza tra conoscere le regole del gioco degli scacchi e saper giocare; così succede che magari sappiamo le regole, ma non giochiamo molto bene. È molto difficile prevedere esattamente cosa succederà in una data reazione chimica; ciò nonostante, la parte più profonda della chimica teorica sfocia nella meccanica quantistica. C'è anche un'altra area della fisica e della chimica che venne sviluppata insieme da entrambe le discipline, ed è estremamente importante. Si tratta del metodo della statistica applicato in una situazione in cui vi siano leggi meccaniche, chiamato giustamente *meccanica statistica*. In ogni reazione chimica sono coinvolti moltissimi atomi, e, come abbiamo visto, gli atomi si agitano e si muovono casualmente in ogni direzione. Se potessimo analizzare ogni singola collisione e seguire in dettaglio il moto di ogni molecola potremmo sperare di prevedere il risultato, ma la quantità di dati numerici necessaria a tale scopo eccede di gran lunga la capacità di qualsiasi calcolatore, figuriamoci quella della mente umana, e quindi era importante sviluppare un metodo per trattare situazioni così complicate. La meccanica statistica, dunque, è la scienza dei fenomeni del calore, o termodinamica. La chimica inorganica è, come scienza, ridotta essenzialmente a ciò che si chiama chimica fisica e chimica quantistica; la chimica fisica studia le velocità di reazione e cosa succede nei dettagli (come si urtano le molecole? quali pezzi vengono scaraventati via per primi? ecc.), e la chimica quantistica ci aiuta a capire cosa succede in termini di leggi fisiche. L'altra area della chimica è la chimica organica, cioè quella che tratta le sostanze legate alle cose viventi. Per un certo tempo si è creduto che le sostanze legate alla vita fossero così meravigliose da non poter venire prodotte artificialmente a partire da materiale inorganico. Questo non è vero affatto: le sostanze sono le stesse della chimica inorganica, solo gli atomi sono disposti in maniera molto più

complicata. La chimica organica ovviamente è in strettissima relazione con la biologia, che le fornisce le sostanze, e con l'industria, e, inoltre, sia la fisica chimica che la meccanica quantistica si possono applicare a composti sia organici sia inorganici. Tuttavia, i problemi principali di chimica organica non riguardano questi aspetti, ma piuttosto l'analisi e la sintesi delle sostanze formate nei sistemi biologici, nelle cose viventi. Questo porta impercettibilmente, passo dopo passo, verso la biochimica, e poi alla biologia stessa, ovvero la biologia molecolare.

Biologia

Eccoci alla scienza della biologia, che è lo studio delle cose viventi. Ai suoi albori, i biologi hanno dovuto affrontare il problema, puramente descrittivo, di scoprire tutte le cose viventi, e quindi dovevano fare cose come contare i peli sulle zampe delle pulci. Dopo aver risolto questi problemi, avendoci lavorato con grande interesse, i biologi si dedicarono ai meccanismi interni dei corpi viventi, prima da un punto di vista grossolano, a causa, naturalmente, dello sforzo necessario a entrare nei dettagli.

Ci fu un primo interessante collegamento tra fisica e biologia, in cui la biologia aiutò la fisica a scoprire la conservazione dell'energia, dimostrata per la prima volta da Mayer in relazione alla quantità di calore assorbito ed emesso da una creatura vivente.

Se osserviamo più da vicino i processi biologici di animali viventi, vediamo molti fenomeni fisici: la circolazione del sangue, pompe, pressione, ecc. Ci sono i nervi; sappiamo bene cosa succede se poggiamo il piede su una pietra tagliente: in qualche modo l'informazione parte dalla gamba e sale su. È interessante come questo avviene. I biologi sono giunti alla conclusione che i nervi sono tubi strettissimi con una parete molto complessa e sottile; attraverso questa parete la cellula pompa ioni, così che ci sono ioni positivi all'esterno e negativi all'interno, come in un condensatore. Ora, questa membrana ha un'interessante proprietà: se «si scarica» in un punto (cioè se alcuni ioni riescono ad attraversare una certa zona in cui quindi il voltaggio risulta ridotto) l'influenza elettrica si fa sentire sugli ioni circostanti, e di conseguenza la membrana lascia passare

gli ioni in un punto nelle vicinanze. Questo a sua volta influenza una zona vicina, ecc., così che si forma un'onda di «penetrabilità» della membrana che si propaga lungo la fibra quando viene eccitata a un'estremità (per esempio poggiando il piede su una pietra tagliente). Quest'onda è paragonabile a ciò che succede in una fila di tessere del domino messe in verticale l'una accanto all'altra: se la prima viene fatta cadere, questa spinge la seconda, che spinge la terza, ecc. Naturalmente si potrà trasmettere un messaggio solo, a meno che le tessere non vengano rimesse in piedi; analogamente nelle cellule nervose ci sono processi che pompano fuori lentamente gli ioni di nuovo, così che il nervo sia pronto a trasmettere un altro impulso. Così sappiamo cosa stiamo facendo (o perlomeno dove siamo). Naturalmente gli effetti elettrici associati all'impulso nervoso si possono rilevare con strumenti elettrici, e, dato che sono proprio effetti elettrici, la fisica relativa ha avuto grandissima influenza sulla comprensione del fenomeno. L'effetto opposto è che, da qualche punto del cervello, viene mandato un messaggio lungo un nervo. Cosa succede alla fine del nervo? Là il nervo si ramifica in sottili filamenti connessi a una struttura vicina a un muscolo, chiamata placca motrice. Per ragioni non esattamente chiare, quando l'impulso raggiunge la fine del nervo vengono rilasciate piccole quantità di una sostanza chiamata acetilcolina (cinque, dieci molecole alla volta) che interessano la fibra muscolare facendola contrarre. Com'è semplice! Che cosa fa contrarre un muscolo? Un muscolo è costituito da un gran numero di fibre molto vicine, contenenti due sostanze diverse (miosina e actinmiosina), ma il meccanismo attraverso il quale la reazione chimica indotta dall'acetilcolina riesce a modificare le dimensioni della molecola non è ancora noto. Quindi i processi fondamentali del muscolo che risultano in movimenti meccanici non li conosciamo.

La biologia è un campo talmente esteso e irto di problemi che è impossibile, qui, citarli tutti: problemi su come funziona la vista (cosa fa esattamente la luce all'occhio), come funziona l'udito, ecc. (Il funzionamento del pensiero verrà discusso più tardi, nel paragrafo sulla psicologia). Ora, questi problemi non sono fondamentali dal punto di vista biologico, non stanno alla base della vita, nel senso che anche se li capissimo perfettamente, ancora non avremmo capito la vita stessa. Per intenderci: chi studia i nervi sente che il suo lavoro è importantissimo, perché tutti gli animali hanno nervi. Ma esiste sicuramente vita senza nervi. Le piante non hanno né nervi né

muscoli, ma funzionano, sono vive lo stesso. Quindi bisogna guardare più in profondità per scorgere i problemi fondamentali della biologia; se lo facciamo, scopriamo che tutte le cose viventi hanno molte caratteristiche comuni. L'aspetto più comune è che sono fatte di cellule, ognuna con il suo complesso meccanismo di elaborazione chimica. Nelle cellule delle piante, per esempio, c'è un meccanismo per assorbire la luce e generare saccarosio, che viene poi consumato nel buio per mantenere la pianta in vita. Quando la pianta viene mangiata, il saccarosio stesso genera nell'animale una serie di reazioni chimiche strettamente legate alla fotosintesi (e al suo opposto nel buio) delle piante.

Nelle cellule dei sistemi viventi ci sono molte reazioni chimiche elaborate, in cui un composto si trasforma in un altro e in un altro ancora. Per dare un'idea degli enormi sforzi impegnati nello studio della biochimica, il diagramma della figura 11 riassume la nostra conoscenza odierna di una piccola parte delle molte serie di reazioni che si svolgono nelle cellule, forse solo l'un per cento. Qui vediamo un'intera serie di molecole che si trasformano l'una nell'altra in una sequenza (o ciclo) di passi abbastanza piccoli, chiamata ciclo di Krebs - il ciclo respiratorio. Ognuna delle sostanze e ognuno dei passi è abbastanza semplice, in termini di cosa cambia nella molecola, ma (e questa è una scoperta fondamentale in biochimica) questi cambiamenti sono relativamente difficili da realizzare in laboratorio. Se abbiamo una sostanza e un'altra molto simile, non è che la prima si trasformi da sola nella seconda, perché le due forme di solito sono separate da una barriera di energia, o «collina».

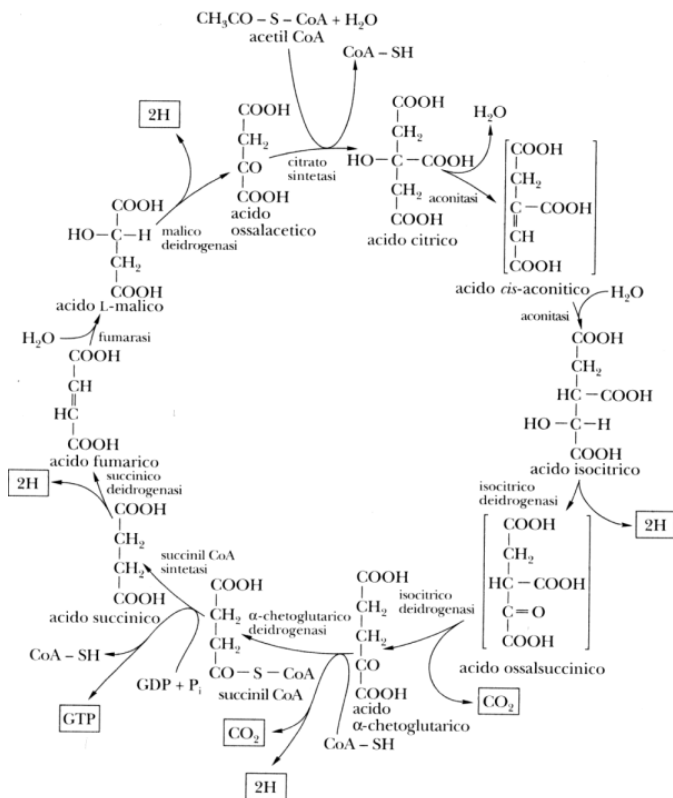


Fig. 11 - Ciclo di Krebs.

Ecco un'analogia: se vogliamo portare un masso da un posto a un altro, alla stessa altezza ma dall'altra parte della collina, lo possiamo spingere giù dalla cima, ma portarlo su richiederà una certa energia. Così la maggior parte delle reazioni chimiche non avvengono spontaneamente, perché c'è di mezzo la cosiddetta *energia di attivazione*. Per aggiungere un altro atomo alla nostra sostanza, bisogna portarlo così vicino da causare un qualche riordinamento, allora si attaccherà. Ma se non riusciamo a dargli energia sufficiente ad avvicinarlo abbastanza, allora non succederà niente: sarà come aver spinto il masso un po' su per la collina: poi rotolerà giù. Tuttavia, se potessimo letteralmente prendere le molecole in mano e spingere e tirare gli atomi in modo da fare posto al nuovo atomo e farlo entrare, allora avremmo trovato un'altra strada, girando attorno alla collina, che non richiede energia in più, e la reazione avverrebbe con facilità. Ora, in effetti, nelle cellule ci sono molecole

enormi, molto più grandi di quelle interessate ai cambiamenti appena descritti, che in qualche maniera complicata tengono le molecole piccole proprio nel modo giusto, così che le reazioni avvengono con facilità. Queste molecole enormi si chiamano *enzimi*. (All'inizio vennero chiamate *fermenti*, perché furono originariamente scoperte nella fermentazione dello zucchero, dove in effetti furono scoperte alcune delle prime reazioni del ciclo). In presenza di un enzima la reazione avverrà.

Gli enzimi sono fatti di altre sostanze chiamate *proteine*, e sono molto grandi e complicati, ognuno diverso dall'altro, essendo ciascuno destinato a controllare una particolare reazione. Nella figura 11 in ogni reazione c'è scritto l'enzima corrispondente (a volte lo stesso enzima controlla due reazioni diverse). Vogliamo sottolineare che gli enzimi stessi non sono coinvolti direttamente nella reazione: non cambiano, semplicemente fanno spostare gli atomi da un posto a un altro. Fatto questo, l'enzima è pronto a ripetere l'operazione su un'altra molecola, come una macchina in una catena di montaggio. Naturalmente bisogna ci siano certi atomi a disposizione, e ci vuole anche un modo di disfarsi di altri atomi. Prendiamo l'idrogeno: ci sono enzimi che contengono unità speciali che trasportano idrogeno per tutte le reazioni chimiche. Per esempio, ci sono tre o quattro enzimi che riducono l'idrogeno e sono usati ovunque nel nostro ciclo in punti diversi. È interessante come lo stesso meccanismo che libera dell'idrogeno in un punto prenda l'idrogeno per usarlo da qualche altra parte. La caratteristica più importante del ciclo della figura 11 è la trasformazione da GDP a GTP (da difosfato di guanidina a trifosfato di guanidina) perché le due sostanze hanno energia molto diversa. Così come in certi enzimi c'è uno «scompartimento» per portare in giro atomi di idrogeno, così ci sono speciali «scompartimenti» che trasportano energia, e coinvolgono il gruppo trifosfato. Così GTP ha più energia di GDP, e se il ciclo si sta svolgendo in un verso si producono molecole che hanno un eccesso di energia e possono andare ad azionare qualche altro ciclo che magari richiede energia, tipo la contrazione di un muscolo. Il muscolo non potrà contrarsi senza GTP; possiamo prendere fibre muscolari, metterle in acqua, aggiungere GTP e le fibre si contraggono, trasformando GTP in GDP se gli enzimi giusti sono presenti. Quindi il sistema fondamentale consiste nella trasformazione da GDP in GTP; durante la notte il GTP che è stato immagazzinato di giorno viene usato per svolgere il ciclo in verso

opposto. Un enzima, vedete, non si preoccupa del verso della reazione: se lo facesse violerebbe una delle leggi della fisica. La fisica è di grande importanza per la biologia e le altre scienze anche per un'altra ragione, che ha a che fare con le tecniche sperimentali. Infatti, se non fosse per il grande sviluppo della fisica sperimentale, questi diagrammi di biochimica non sarebbero noti oggi. La ragione è che lo strumento più utile in assoluto per analizzare questo sistema così incredibilmente complicato è di dare un nome proprio agli atomi usati nelle reazioni. Per esempio, se potessimo introdurre nel ciclo un po' di anidride carbonica dipinta di verde, e poi misurare tre secondi più tardi dov'è finita, cercando il colore, e poi guardare dieci secondi dopo, ecc., potremmo seguire passo per passo le reazioni. Che cos'è la vernice verde? Sono i diversi *isotopi*. Ricordiamo che le proprietà chimiche degli atomi sono determinate dal numero di elettroni, non dalla massa del nucleo. Ma ci possono essere, per esempio nel carbonio, sei o sette neutroni, insieme con i sei protoni caratteristici degli atomi di carbonio. Chimicamente, i due atomi C^{12} e C^{13} sono uguali, ma hanno pesi diversi e diverse proprietà nucleari, quindi si possono distinguere. Usando isotopi di peso diverso, o perfino isotopi radioattivi come il C^{14} , che forniscono un mezzo anche più sensibile per rintracciare quantità molto piccole, è possibile seguire tutte le reazioni.

Ora torniamo alla descrizione degli enzimi e delle proteine. Non tutte le proteine sono enzimi, ma tutti gli enzimi sono proteine. Ci sono molte proteine, quali le proteine nei muscoli, le proteine strutturali che si trovano nella cartilagine, nei capelli, nella pelle, ecc., che non sono enzimi. Però le proteine sono una componente molto caratteristica della vita: prima di tutto tra esse troviamo tutti gli enzimi, e poi costituiscono quasi tutto il resto della materia vivente. Le proteine hanno una struttura interessante e semplice. Sono una serie, o catena, di diversi *amminoacidi*. Ci sono venti amminoacidi diversi, e si possono combinare tra loro a formare catene in cui la spina dorsale è $CO-NH$, ecc. Le proteine non sono altro che catene di vari amminoacidi, ognuno dei quali probabilmente serve a qualche scopo speciale. Alcuni, per esempio, hanno un atomo di zolfo in un certo posto: quando in una proteina ci sono due atomi di zolfo essi formano un legame, cioè legano la catena formando un anello. Un altro amminoacido ha un atomo di ossigeno in più che lo rende acido, un altro ancora è basico. Alcuni hanno grossi raggruppamenti che sporgono da una parte, e

occupano un sacco di spazio. Uno degli amminoacidi, la prolina, non è veramente un amminoacido, ma un imminoacido. C'è una lieve differenza, e il risultato è che quando la prolina è presente in una catena, la catena si avvita. Se volessimo produrre una particolare proteina, la lista delle istruzioni sarebbe più o meno così: mettere qui uno di quegli anelli dello zolfo, aggiungere qualcosa che occupi spazio, poi attaccare una cosa che faccia avvitare la catena. In questo modo otterremmo una catena molto complicata, aggrovigliata su se stessa e con una struttura complessa; questo probabilmente è il modo in cui vengono costruiti gli enzimi. Uno dei grandi trionfi in tempi recenti (dal 1960) è stata la scoperta dell'esatta disposizione spaziale atomica di certe proteine fatte di cinquanta o sessanta amminoacidi in fila. Più di mille atomi (quasi duemila, se contiamo gli atomi di idrogeno) sono stati localizzati in una configurazione complessa in due proteine. La prima è l'emoglobina. È triste dover ammettere che dalla scoperta della configurazione non si capisce niente: né perché funziona né come. Naturalmente, questo è il prossimo problema da affrontare. Un altro problema è: come fanno gli enzimi a sapere cosa devono fare? Un moscerino con gli occhi rossi genera un piccolo moscerino con gli occhi rossi, e bisogna che il messaggio per l'intera configurazione di enzimi, di produrre pigmenti rossi, passi da un moscerino all'altro. Questo avviene tramite una sostanza nel nucleo della cellula, non una proteina, chiamata DNA (acido desossiribonucleico). Questa è la sostanza chiave che viene trasferita da una cellula all'altra (per esempio, le cellule degli spermatozoi sono fatte perlopiù di DNA) e trasporta l'informazione di come fare gli enzimi. Il DNA è la matrice. Che aspetto ha la matrice, e come funziona? Prima di tutto, bisogna che riesca a riprodursi. Secondo, deve essere in grado di dare istruzioni alla proteina. Riguardo alla riproduzione, potremmo ipotizzare che funzioni in modo simile alla riproduzione delle cellule, in cui una cellula, semplicemente, diventa più grande e poi si divide a metà. Sarà così anche con le molecole di DNA, allora? Diventano più grandi e poi si dividono a metà? Sicuramente ogni singolo atomo della molecola non cresce e non si divide in due parti! No, è impossibile riprodurre una molecola a meno di usare qualche metodo più ingegnoso. La struttura del DNA venne studiata a lungo, prima chimicamente per scoprirne la composizione, e poi con i raggi X per trovare la sua configurazione spaziale. Il risultato fu la seguente notevole scoperta: la molecola di DNA è costituita da una

coppia di catene avvitate l'una intorno all'altra. La spina dorsale di ogni catena (analoga a una catena di proteine, ma chimicamente molto diversa) è una serie di zuccheri e gruppi di fosfati, come mostrato nella figura 12. Ora vediamo in che modo la *doppia elica* potrebbe contenere istruzioni: se la tagliamo a metà per il lungo, separando le due catene, otteniamo una serie *TAAGC...* e ogni cosa vivente potrebbe avere una serie diversa. Quindi forse, in qualche modo, le istruzioni specifiche per la fabbricazione di proteine sono contenute nelle serie specifiche di DNA.

Attaccate a ogni zucchero lungo l'asse, per legare insieme le due catene, ci sono certe coppie di legami trasversali. Però non sono tutti dello stesso tipo: ce ne sono di quattro tipi, detti *adenina*, *timina*, *citosina* e *guanina*; le chiameremo *A*, *T*, *C*, *G*. L'interessante è che solo certe coppie possono formarsi, per esempio *A* con *T* e *C* con *G*. Queste coppie sono situate sulle due catene in modo da «incastrarsi», e hanno una forte energia di interazione. Ma *C* non si incastra con *A* né con *T*, si incastrano solo *A* con *T* e *C* con *G*. Quindi, se su una catena c'è una particolare lettera, sull'altra ci deve essere in corrispondenza la lettera complementare.

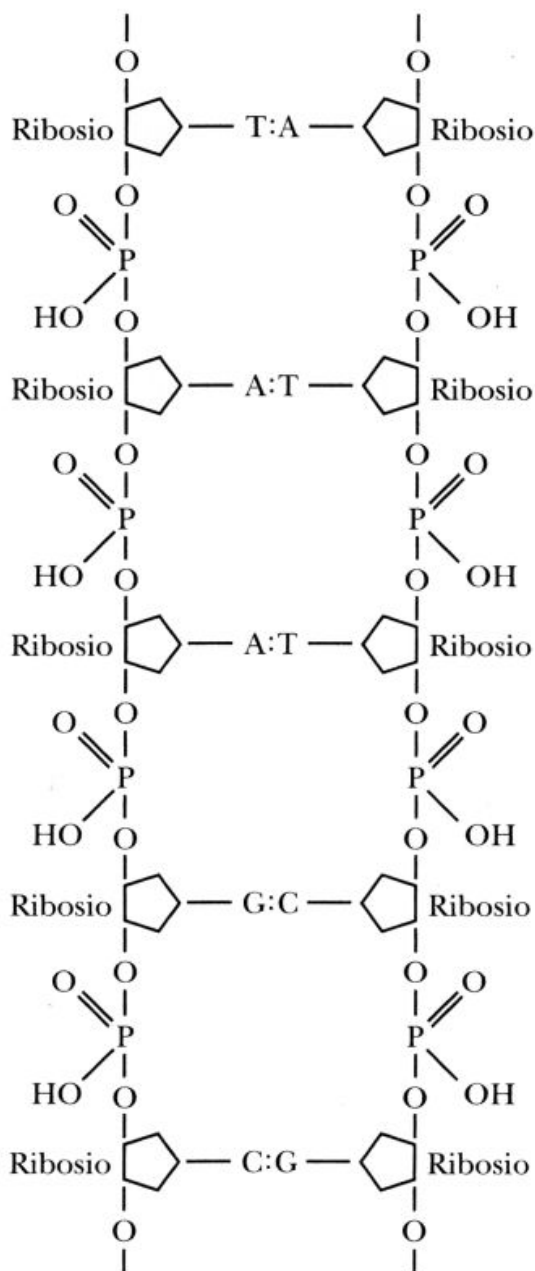


Fig. 12 - Diagramma schematico del DNA.

E allora, la riproduzione? Se tagliamo la catena in due, come

facciamo a costruirne un'altra uguale? Se dentro la cellula c'è un reparto di fabbricazione che produce fosfato, zucchero e unità singole di A, T, C, G, le uniche a legarsi alla nostra catena divisa saranno quelle giuste, cioè i complementi di TAAGC..., vale a dire ATTCG... Quindi succede che la doppia catena viene divisa in due per il lungo durante la divisione della cellula: metà finisce in una cellula, metà nell'altra, e per ciascuna si forma una catena complementare.

Viene poi il problema: in che modo l'ordine delle unità A, T, C, G determina la sistemazione degli amminoacidi nella proteina? Questo è il problema aperto fondamentale nella biologia di oggi. I primi indizi, i primi elementi di conoscenza sono questi: nella cellula ci sono minuscole particelle chiamate microsomi, e si è scoperto che quello è il posto in cui si formano le proteine. Ma i microsomi non sono nel nucleo, dove si trova il DNA con le sue istruzioni. Sembra ci sia qualcosa che non va. Tuttavia, si sa anche che piccole parti di molecola escono dal DNA (non così grandi come la molecola di DNA che porta tutta l'informazione, ma come sue piccole porzioni). Queste parti si chiamano RNA, ma ora non importa. È come una copia di DNA, una copia ridotta. L'RNA, che in qualche modo porta un messaggio su quale proteina produrre, va da un microsomo: questo si sa. Quando arriva lì, la proteina viene sintetizzata nel microsomo (e anche questo si sa). Tuttavia, i particolari su come vengano scelti e sistemati gli amminoacidi in base al codice nell'RNA sono tuttora sconosciuti.

Non siamo capaci di leggere il codice. Anche se conoscessimo l'esatta sequenza ATCCA... non sapremmo quale proteina sarà prodotta. Sicuramente nessun campo di studio sta facendo più progressi della biologia al giorno d'oggi, su così tanti fronti, e se dovessimo scegliere l'ipotesi più importante di tutte, quella che più di ogni altra ci guida nel tentativo di capire la vita, sarebbe quella che *tutte le cose sono fatte di atomi*, e che tutto ciò che le cose viventi fanno si può comprendere in termini di movimenti e oscillazioni degli atomi.

Astronomia

In questa spiegazione lampo del mondo intero è ora il turno

dell'astronomia. L'astronomia è più antica della fisica; in effetti dette l'avvio alla fisica, mostrando l'elegante semplicità del moto delle stelle e dei pianeti, la cui comprensione fu l'inizio della fisica. Ma la scoperta più notevole di tutta l'astronomia fu che *le stelle sono fatte di atomi dello stesso tipo di quelli della Terra*.³ Come ci si è arrivati?

Gli atomi liberano luce che ha frequenze definite, una cosa tipo il timbro degli strumenti musicali, che hanno altezze o frequenze sonore ben precise. Quando ascoltiamo note diverse riusciamo a riconoscerle, ma quando osserviamo con gli occhi una miscelanza di colori non riusciamo a discernere le varie parti, perché l'occhio non è nemmeno lontanamente sensibile quanto l'orecchio a questo scopo. Comunque, possiamo analizzare le frequenze delle onde luminose con uno spettroscopio e vedere le «note» emesse dagli atomi nelle diverse stelle. In realtà, due elementi chimici furono scoperti su una stella prima che sulla Terra: sono l'elio, scoperto la prima volta sul Sole (da cui il nome), e il tecnezio, su certe stelle fredde. Questo, ovviamente, ci permette grandi passi avanti nella comprensione delle stelle, perché sono fatte degli stessi atomi che troviamo sulla Terra. La nostra conoscenza degli atomi, specialmente in condizioni di alta temperatura e bassa densità, è ora tanto approfondita da permetterci di analizzare il comportamento della sostanza stellare usando la meccanica statistica. Anche se non possiamo riprodurre sulla Terra le stesse condizioni, spesso usando le leggi di base della fisica riusciamo a prevedere con precisione, o quasi, cosa accadrà. Così la fisica aiuta l'astronomia. Per strano che possa sembrare, la nostra comprensione della distribuzione della materia all'interno del Sole è molto migliore di quella all'interno della Terra. Quello che succede all'interno di una stella si conosce molto meglio di quanto si potrebbe supporre dalla difficoltà di dover osservare un puntino luminoso attraverso un telescopio, perché possiamo calcolare cosa dovrebbero fare gli atomi all'interno della stella in quasi tutte le circostanze.

Una delle scoperte più impressionanti fu perché le stelle continuano a bruciare, cioè l'origine dell'energia delle stelle. Uno degli scienziati che aveva contribuito alla fondamentale scoperta che dovevano avvenire reazioni nucleari nelle stelle per produrre l'energia necessaria era fuori con la sua ragazza una notte, e lei disse: «Guarda come brillano le stelle!», e lui rispose: «Sì, e in questo momento io sono il solo a sapere *perché* brillano». Lei gli rise in faccia, per nulla impressionata di essere accanto all'unico uomo al

mondo che allora sapesse perché le stelle brillano. È triste essere soli, ma così va il mondo. È il «rogo» nucleare dell'idrogeno che dà energia al Sole: l'idrogeno si trasforma in elio. Inoltre, in ultima analisi, la produzione dei vari elementi chimici avviene all'interno delle stelle, a partire dall'idrogeno. La roba di cui siamo fatti noi fu «cucinata» molto tempo fa in una stella, e sparata fuori. Come facciamo a saperlo? C'è un indizio. La proporzione dei diversi isotopi (quanto C¹², quanto C¹³, ecc.) non viene mai alterata da reazioni chimiche, perché le reazioni chimiche sono le stesse per tutti gli isotopi. Le proporzioni sono semplicemente il risultato di reazioni nucleari. Osservando le proporzioni degli isotopi nel freddo, spento tizzone che noi siamo, possiamo scoprire com'era fatta la fornace in cui si formò la materia di cui siamo composti. Quella fornace era come le stelle, e quindi è molto probabile che i nostri elementi siano stati «fatti» nelle stelle ed eruttati nelle esplosioni che chiamiamo *nove e supernove*. L'astronomia è così vicina alla fisica che avremo molto spesso a che fare con essa nel corso del nostro studio.

Geologia

Occupiamoci ora di quelle note come scienze della terra, o geologia. Prima di tutto la meteorologia e il tempo. Naturalmente gli strumenti della meteorologia sono strumenti fisici, e fu lo sviluppo della fisica sperimentale a renderli disponibili, come abbiamo spiegato prima. Tuttavia, la teoria della meteorologia non è mai stata elaborata in modo soddisfacente dai fisici. «Be',» direte voi «non c'è altro che aria, e le equazioni del moto dell'aria sono note». Certo che le conosciamo. «Quindi, se conosciamo le condizioni atmosferiche oggi, perché non potremmo prevedere quelle di domani?». Prima di tutto, non conosciamo *davvero* le condizioni atmosferiche oggi, perché l'aria turbinava vorticosamente ovunque. Risulta molto delicata, e anche instabile. Se avete mai visto l'acqua scorrere giù da una diga, e trasformarsi in ammassi e gocce mentre cade, capirete cosa intendo con *instabile*. La condizione dell'acqua prima di arrivare sullo sfioratore è nota: è perfettamente liscia. Ma non appena inizia a cadere, dove comincia a separarsi, a spruzzare? Cosa determina quanto saranno grandi gli ammassi in cui si divide, e dove

saranno? Questo non si sa, perché l'acqua è instabile. Anche una massa d'aria che si muove in modo uniforme, quando passa sopra una montagna inizia a turbinare e a formare vortici. In molti campi troviamo questa situazione di *flusso turbolento* che non siamo in grado di analizzare, oggi come oggi. Abbandoniamo quindi la meteorologia, e parliamo di geologia!

Il problema fondamentale della geologia è: che cosa è responsabile dell'aspetto odierno della Terra? I processi più ovvi sono davanti ai nostri occhi: l'erosione dei fiumi, dei venti, ecc. Questi sono abbastanza facili da capire, ma per ogni briciola erosa deve succedere qualcos'altro. In media le montagne oggi non sono più basse che in passato, quindi ci devono essere processi di formazione delle montagne. Se si studia geologia si scopre che in effetti questi processi di orogenesi esistono, così come esistono processi vulcanici, che nessuno capisce e che costituiscono metà della geologia. Il fenomeno dei vulcani in realtà non è affatto compreso. Cosa causi un terremoto in definitiva non si sa. Si sa che qualcosa sta spingendo qualcos'altro, poi a un certo punto scatta e scivolano uno sopra l'altro, d'accordo. Ma che cosa spinge, e perché? Secondo la teoria ci sono correnti all'interno della Terra, correnti circolanti dovute alla differenza di temperatura fra l'interno e l'esterno, che nel loro movimento spingono leggermente la superficie. Quindi, se ci sono due correnti opposte una vicina all'altra, nella regione in cui si incontrano la materia si ammucchierà a formare catene di montagne che si troveranno in condizioni di tensione e produrranno vulcani e terremoti.

E l'interno della Terra? Molto si sa sulla velocità delle onde di terremoto attraverso la Terra e la densità di distribuzione della Terra. Tuttavia, i fisici non sono stati capaci di elaborare una teoria soddisfacente su quanto dovrebbe essere densa una sostanza alle pressioni prevedibili al centro della Terra. In altre parole, non riusciamo a prevedere molto bene le proprietà della materia in queste circostanze. Ce la caviamo molto meglio con la materia nelle stelle che sulla Terra. La matematica relativa sembra un po' troppo difficile, finora, ma forse non ci vorrà molto perché qualcuno si renda conto che è un problema importante, e lo risolva. L'altro aspetto, naturalmente, è che anche se conoscessimo la densità non riusciremmo comunque a calcolare le correnti circolanti. Né riusciamo veramente a capire le proprietà delle rocce in condizioni di alta pressione. Non riusciamo a dire con quale velocità le rocce

«cedono»: bisogna dedurlo sperimentalmente.

Psicologia

Consideriamo ora la scienza della psicologia. Incidentalmente, vorrei dire che la psicoanalisi non è una scienza: è tutt'al più un processo medico, forse anche più simile alla stregoneria; ha una teoria su cosa causi la malattia («spiriti» di diverso tipo, ecc.). La teoria dello stregone è che la causa della malattia è uno spirito che proviene dall'aria; scuotere un serpente sopra la testa non aiuta, ma il chinino sì. Quindi, se siete ammalati, vi consiglierei comunque di andare dallo stregone, perché è la persona che, nella tribù, conosce meglio la malattia; d'altra parte la sua conoscenza non è scienza. La psicoanalisi non è mai stata verificata accuratamente con esperimenti, e non c'è modo di trovare una lista dei casi in cui ha funzionato, i casi in cui non ha funzionato, ecc. Le altre aree della psicologia, che riguardano cose tipo la fisiologia dei sensi (cosa succede nell'occhio e nel cervello) sono, se vogliamo, meno interessanti. Eppure ci sono stati progressi piccoli ma reali nello studio di questi problemi. Uno dei problemi tecnici più interessanti può essere chiamato psicologia, oppure no. Il problema centrale della mente, se vogliamo, o del sistema nervoso è: quando un animale impara qualcosa, riesce a fare una cosa diversa da prima, e quindi anche le cellule del suo cervello devono essere cambiate, se sono fatte di atomi. In che modo sono diverse? Non sappiamo cosa cercare, o dove guardare, quando si memorizza qualcosa. Non sappiamo cosa significa, o quale cambiamento avviene nel sistema nervoso, quando si impara qualcosa. A questa importante questione non è stata data alcuna soluzione. Comunque, ipotizzando che ci sia una certa cosa chiamata «memoria», il cervello è una tale massa di fili e nervi interconnessi che probabilmente non si può analizzare in modo diretto. C'è un'analogia con le calcolatrici o i calcolatori, nel senso che anch'essi hanno molte linee, e una sorta di elemento analogo a una sinapsi, o connessione tra un nervo e l'altro. Questo è un argomento molto interessante che non abbiamo tempo di discutere oltre: la relazione tra il pensiero e i calcolatori. Bisogna rendersi conto, naturalmente, che questo argomento ci può dire ben

poco sulla reale complessità del comportamento umano ordinario. Gli esseri umani sono così diversi tra loro. La via per arrivarci è ancora lunga, bisogna partire da molto più indietro. Se riuscissimo a capire anche solo come funziona un cane, sarebbe già un bel progresso. I cani sono più semplici da capire, ma nemmeno un cane si sa come funziona.

Perché è andata proprio così

Perché la fisica possa essere utile alle altre scienze in modo teorico, oltre che per il suo contributo nell'invenzione degli strumenti, occorre che la scienza in questione fornisca al fisico una descrizione del suo oggetto di studio in un linguaggio che il fisico possa capire. Si può chiedere: «Perché la rana salta?» e il fisico non sa rispondere. Se gli dicono cos'è una rana, di quante molecole è fatta, che c'è un nervo lì, uno là, ecc., allora è diverso. Se ci dicono, più o meno, com'è la Terra, o come sono le stelle, allora possiamo fare previsioni. Affinché la teoria fisica sia di qualche utilità, dobbiamo sapere dove stanno gli atomi. Per capire la chimica, dobbiamo sapere esattamente quali atomi ci sono, altrimenti non possiamo analizzare niente. Questa è solo una delle limitazioni, naturalmente.

C'è un altro tipo di problema nelle scienze sorelle che non esiste in fisica; potremmo chiamarla, in mancanza di termini migliori, la «questione storica». Perché è andata proprio così? Quando avremo capito tutto in biologia, vorremo sapere come sono arrivate qui tutte le cose che vivono sulla Terra. Esiste la teoria dell'evoluzione, parte importante della biologia. In geologia, non solo vogliamo sapere come si formano le montagne, ma come si è formata la Terra all'inizio, l'origine del sistema solare, ecc. Questo, naturalmente, ci porta a voler sapere che tipo di materia c'era nel mondo. Come si sono evolute le stelle? Quali erano le condizioni iniziali? Questo è il problema storico dell'astronomia. Molto si sa sulla formazione delle stelle, la formazione degli elementi di cui siamo fatti, e perfino un po' sull'origine dell'universo.

Ma in fisica non c'è alcuna questione storica. Non esistono problemi tipo: «Ecco le leggi della fisica, come mai sono proprio queste?». Non pensiamo, al momento, che le leggi della fisica siano in qualche

modo variabili nel tempo, che possano essere state diverse nel passato. Naturalmente è possibile, e non appena scopriremo che è così, la questione storica in fisica verrà inserita nel resto della storia dell'universo, e allora i fisici si porranno gli stessi problemi degli astronomi, i geologi e i biologi.

Infine c'è un problema fisico comune a molti campi, molto antico e non ancora risolto. Non è il problema di trovare nuove particelle fondamentali, ma qualcosa lasciato in sospeso molto tempo fa, più di cento anni. Nessuno è mai riuscito ad analizzarlo matematicamente in modo soddisfacente, nonostante la sua importanza nelle scienze sorelle: è l'analisi dei fluidi circolanti, o fluidi turbolenti. Osservando l'evoluzione di una stella, si arriva a un punto in cui si capisce che sta per iniziare la convezione, e poi non si riesce più a prevedere niente. Qualche milione di anni più tardi la stella esplode, ma non si riesce a darne una ragione. Non riusciamo ad analizzare il tempo meteorologico. Non conosciamo i meccanismi dei moti che avvengono all'interno della Terra. La forma più semplice del problema è: si prende un tubo molto lungo e si pompa acqua dentro ad alta velocità. Ci chiediamo: per spingere una data quantità di acqua lungo il tubo, quanta pressione ci vuole? È impossibile stabilirlo a partire dai principi elementari e dalle proprietà dell'acqua. Se l'acqua scorre lentamente, oppure se si usa un liquido vischioso come il miele, allora si riesce a fare per benino, lo troverete su qualsiasi libro di testo. Quello che proprio non si riesce a fare è analizzare l'acqua vera, quella bagnata, che scorre in un tubo. Ecco il problema centrale che un giorno o l'altro dovremo riuscire a risolvere.

Una volta un poeta disse: «L'universo intero è in un bicchiere di vino». Probabilmente non sapremo mai in che senso lo disse, perché i poeti non scrivono per essere compresi. Ma è vero che se osserviamo un bicchiere di vino abbastanza attentamente vediamo l'intero universo. Ci sono le cose della fisica: il liquido turbolento e in evaporazione in funzione del vento e del tempo, il riflesso sul vetro del bicchiere, e la nostra immaginazione aggiunge gli atomi. Il vetro è un distillato di rocce della Terra, e nella sua composizione vediamo i segreti dell'età dell'universo, e l'evoluzione delle stelle. Ci sono i fermenti, gli enzimi, i substrati e i prodotti. Nel vino si trova la grande generalizzazione: tutta la vita è fermentazione. Non si può scoprire la chimica del vino senza scoprire, come fece Louis Pasteur, la causa di molte malattie. Com'è vivido il novello, che imprime la

sua esistenza nella consapevolezza di chi lo osserva! Se le nostre fragili menti, per convenienza, dividono il bicchiere di vino, l'universo, in parti (fisica, biologia, geologia, astronomia, psicologia e così via) ricordiamo sempre che la natura non lo sa! Quindi rimettiamo tutto insieme, e non dimentichiamo qual è il suo scopo. Togliamoci un ultimo piacere: beviamo, e dimentichiamo!

IV

LA CONSERVAZIONE DELL'ENERGIA

Che cos'è l'energia?

In questo capitolo iniziamo uno studio più particolareggiato dei diversi aspetti della fisica, avendo concluso la descrizione generale. Per illustrare le idee e il tipo di ragionamento che viene usato nella fisica teorica, esamineremo ora una delle leggi di base della fisica: la conservazione dell'energia.

Tutti i fenomeni naturali a tutt'oggi conosciuti sono governati da una certa legge, della quale non si conoscono eccezioni: è una legge esatta, per quanto ne sappiamo. Si chiama *conservazione dell'energia*, e afferma l'esistenza di una certa quantità, chiamata *energia*, che non cambia mai attraverso i molteplici mutamenti della natura. È un'idea piuttosto astratta, perché è un principio matematico: dice che esiste una quantità numerica che non cambia qualsiasi cosa succeda. Non è la descrizione di un meccanismo, non è niente di concreto; dice semplicemente che se calcoliamo un certo numero, lasciamo che la natura faccia il suo corso e poi lo calcoliamo di nuovo, otteniamo lo stesso risultato. (Un po' come quando si ha un alfiere su una casella nera: dopo un numero imprecisato di mosse, di cui non conosciamo i dettagli, è ancora su una casella nera. È una legge di questa natura). Trattandosi di un'idea astratta, ne illustreremo il significato mediante un'analogia.

Immaginate che un bambino, il solito Pierino, abbia dei blocchi per le costruzioni, cubi assolutamente indistruttibili e indivisibili, tutti uguali. Supponiamo ne abbia ventotto. Sua madre li ripone in una stanza alla mattina; alla sera, curiosa, li conta e scopre una legge fenomenale: qualunque cosa Pierino abbia fatto con i blocchi, ce ne sono ancora ventotto! Questo si ripete per un certo numero di giorni, finché un bel giorno la mamma ne trova solo ventisette; fa una piccola ricerca, e ne scova uno sotto il tappeto: bisogna cercare ovunque per assicurarsi che il numero sia sempre quello. Una sera, tuttavia, il numero sembra cambiato davvero: ce ne sono solo ventisei. Un'accurata indagine rivela che la finestra era aperta, e guardando nel giardino si scoprono i due blocchi mancanti. Un altro giorno ce ne sono trenta! Questo provoca un notevole sconcerto, finché non si scopre che l'amico Gianni era venuto a far visita a Pierino portando

con sé le sue costruzioni, e ha dimenticato qualche pezzo nella stanza. La mamma getta via i blocchi in più, chiude la finestra, non lascia più venire Gianni a giocare, e così per un certo tempo tutto funziona, finché una sera ne trova solo venticinque. Però nella stanza c'è uno scatolone per i giocattoli; la mamma fa per aprirlo ma il bambino comincia a strillare: «Non aprire la mia scatola!». Così la mamma non può controllare cosa c'è dentro, ma, essendo molto curiosa e anche ingegnosa, si fa venire in mente un piano. Sapendo che ogni cubo per le costruzioni pesa circa un etto, pesa la scatola dei giochi una sera in cui vede tutti i ventotto cubi, e scopre che, vuota, pesa 500 grammi. La prossima volta, per controllare se ci sono dentro dei cubi, dovrà togliere dal peso (P) della scatola 500 grammi e dividere per 100. In questo modo scopre quanto segue:

$$[1] \quad \text{N. cubi visibili} + \frac{P - 500\text{g}}{100\text{g}} = \text{const.}$$

Poi trova qualche discordanza, ma uno studio accurato mostra che il livello dell'acqua nel lavandino è salito. Il bambino getta i cubi nell'acqua, e la mamma non li vede perché l'acqua è torbida, ma può scoprire quanti ce ne sono aggiungendo un altro termine alla formula. Poiché prima l'altezza (H) dell'acqua era 15 centimetri e ogni cubo fa alzare il livello di 6 millimetri, la nuova formula sarà

$$[2] \quad \text{N. cubi visibili} + \frac{P - 500\text{g}}{100\text{g}} + \frac{H - 15\text{cm}}{0,6\text{cm}} = \text{const.}$$

Via via che aumenta la complessità del suo ambiente, la donna scopre un'intera serie di termini, che rappresentano modi di calcolare quanti cubi ci sono in posti in cui non può guardare. Il risultato è una formula complessa, una quantità da calcolare che

rimane sempre la stessa in ogni situazione.

Cosa c'entra tutto questo con la conservazione dell'energia? L'aspetto più notevole che emerge da questo esempio è che i blocchi per le costruzioni non c'entrano per niente. Se togliamo il primo termine della somma sia in [1] sia in [2] ci ritroviamo a calcolare cose più o meno astratte. L'analogia si manifesta nei seguenti punti. Prima di tutto, nel calcolo bisogna tener conto dell'energia che esce dal sistema e di quella che viene introdotta. Per verificare la conservazione dell'energia dobbiamo assicurarci di non averne aggiunta né tolta. In secondo luogo, l'energia si presenta in svariate forme, analoghe ai blocchi nella scatola, nell'acqua e così via: gravitazionale, cinetica, termica, elastica, elettrica, chimica, radiante, nucleare, di massa; ognuna ha un'espressione diversa. Sommando tutte le espressioni per ognuno di questi contributi, l'energia non cambierà, se non per quella che entra o esce. È importante rendersi conto del fatto che al momento, in fisica, non sappiamo *che cos'è l'energia*. Non abbiamo un modello in cui l'energia è quantizzata in «blocchi» di dimensione definita. Non è così. Tuttavia, ci sono espressioni per calcolare certe quantità numeriche, e quando le sommiamo tutte insieme il risultato è sempre 28, sempre lo stesso numero. Si tratta di un'astrazione, e non di una spiegazione del meccanismo, o del perché le espressioni siano proprio quelle.

Energia potenziale gravitazionale

La conservazione dell'energia si può comprendere solo se abbiamo un'espressione per ognuna delle forme in cui si presenta. Vorrei ora discutere l'espressione dell'energia gravitazionale vicino alla superficie della Terra, e la ricaverò in un modo che non ha niente a che fare con la sua origine storica. Si tratta semplicemente di una linea di dimostrazione inventata per questa particolare lezione, per illustrarvi come da pochi fatti, con un ragionamento logico, sia possibile trarre una gran quantità di informazioni sulla natura. È un esempio del genere di lavoro che impegna i fisici teorici. Segue la falsariga dell'eccellente argomentazione di Carnot sull'efficienza delle macchine a vapore.⁴

Consideriamo una macchina per sollevare pesi, cioè che solleva un

peso abbassandone un altro, e facciamo un'ipotesi: per questo tipo di macchine non è possibile il moto perpetuo. (In effetti, l'impossibilità in assoluto del moto perpetuo è un enunciato generale del principio di conservazione dell'energia). Bisogna fare molta attenzione nel definire il moto perpetuo; facciamolo prima per le macchine per sollevare pesi. Se dopo aver sollevato e abbassato un bel po' di pesi riportiamo la macchina nelle condizioni iniziali e scopriamo che il risultato netto è il sollevamento di un certo peso, allora avremo realizzato il moto perpetuo, perché possiamo usare quel peso per far funzionare qualcos'altro. Questo, naturalmente, se effettivamente la macchina viene riportata nelle esatte condizioni iniziali, e se è completamente autonoma, cioè non riceve energia da fonti esterne (come i blocchi per le costruzioni dell'amico di Pierino). Una semplice macchina per sollevare pesi è la leva della figura 13, che solleva tre unità di peso sul piatto di sinistra mettendo una unità di peso sul l'altro piatto.

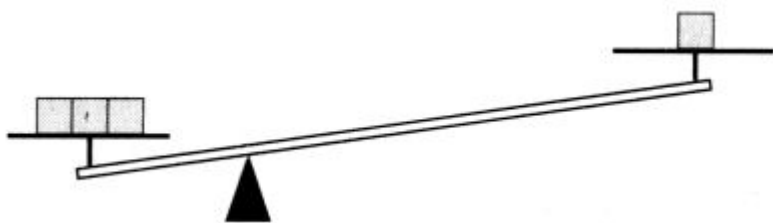


Fig. 13 - Semplice macchina per sollevare pesi.

Naturalmente se si trattasse di una leva reale, per metterla in funzione bisognerebbe alleggerire un po' il piatto di sinistra; d'altra parte, abbassando le tre unità di peso a sinistra potremo alzare un peso unitario a destra, nel caso reale, solo barando un pochino, togliendo qualcosa da quest'ultimo piatto. Per il momento trascuriamo questo fatto. Le macchine ideali, che non esistono, non richiedono interventi di questo tipo. Una macchina reale può essere, in un certo senso, *quasi* reversibile: se solleva tre unità di peso abbassandone una, allora solleverà *quasi* una unità abbassandone tre. Supponiamo ci siano due classi di macchine: quelle *non reversibili*, che includono tutte le macchine reali, e quelle *reversibili*, che naturalmente sono irrealizzabili, indipendentemente dall'accuratezza del progetto. Supponiamo, tuttavia, che una macchina reversibile esista, e abbassando un'unità di peso di uno spostamento unitario sollevi

tre unità di peso. Chiamiamola A . Supponiamo anche che questa particolare macchina reversibile sollevi le tre unità di peso a un'altezza X . Poi immaginiamo di avere un'altra macchina B , non necessariamente reversibile, che abbassando un'unità di peso di uno spostamento unitario sollevi tre unità a un'altezza Y . Possiamo ora dimostrare che Y è *minore o uguale a* X , cioè che è impossibile costruire una macchina che sollevi un peso più in alto di una macchina reversibile. Vediamo perché. Supponiamo per assurdo che Y sia maggiore di X . Prendiamo un peso unitario e lo abbassiamo nella macchina B , il che solleva tre unità di peso a un'altezza Y . Allora potremmo abbassare il peso da Y a X , ricavando forza motrice gratis, e usare la macchina A alla rovescia per abbassare le tre unità di un tratto X e sollevare il peso unitario di uno spostamento unitario. Questo riporta il peso unitario dov'era all'inizio, ed entrambe le macchine sarebbero pronte per venire usate di nuovo. Avremmo quindi realizzato il moto perpetuo, che all'inizio avevamo escluso come possibilità. Con queste ipotesi, dobbiamo quindi dedurre che Y è *minore o uguale a* X , così che di tutte le macchine possibili quella reversibile è la migliore.

Possiamo anche dimostrare che tutte le macchine reversibili sollevano pesi *esattamente alla stessa altezza*. Infatti, supponiamo che anche la macchina B sia reversibile. Il ragionamento precedente funziona ancora, e quindi Y è minore o uguale a X ; però ora possiamo rovesciarlo, e dimostrare che X è *minore o uguale a* Y . Quindi X e Y devono essere uguali. Questa è un'osservazione veramente notevole, perché ci permette di studiare a quale altezza certe macchine solleveranno certi pesi a prescindere dal loro meccanismo interno. Sappiamo immediatamente che se un'elaboratissima serie di leve solleva tre unità di peso abbassandone una di uno spostamento unitario e una semplice leva fa la stessa cosa ed è essenzialmente reversibile, la macchina elaborata non solleverà il peso più in alto della leva semplice; tutt'al più lo porterà alla stessa altezza. Se la macchina è reversibile, riusciamo anche a calcolare esattamente a quale altezza solleverà i pesi. Riassumendo: ogni macchina reversibile che abbassando un chilo di un metro solleva tre chili, indipendentemente dal suo meccanismo di funzionamento, solleva i tre chili sempre alla stessa altezza X . La domanda ora naturalmente è: quanto vale X ?

Consideriamo quindi una macchina reversibile che sollevi tre pesi a un'altezza X abbassandone uno. Mettiamo tre palle in una rastrel-

liera fissa, come nella figura 14. Una palla è su un supporto a un metro di altezza da terra; la macchina può sollevare tre palle abbassandone una di uno spostamento unitario. Sia la rastrelliera fissa, sia la piattaforma su cui stanno le tre palle quando vengono sollevate hanno tre ripiani, il primo a terra e gli altri a distanza X l'uno dall'altro (a). Prima facciamo rotolare le palle orizzontalmente dalla rastrelliera ai ripiani della piattaforma (b), e supponiamo che questo non richieda energia, perché l'altezza non varia. Poi entra in funzione la macchina reversibile: abbassa la palla singola fino a terra, e solleva la piattaforma di un tratto X (c). La rastrelliera è astutamente sistemata in modo che le tre palle siano nuovamente a livello dei ripiani, sicché le possiamo scaricare sulla rastrelliera (d). Avendo scaricato le tre palle possiamo ora riportare la macchina alle condizioni iniziali, e ci ritroviamo con tre palle sui tre ripiani superiori e una in terra.

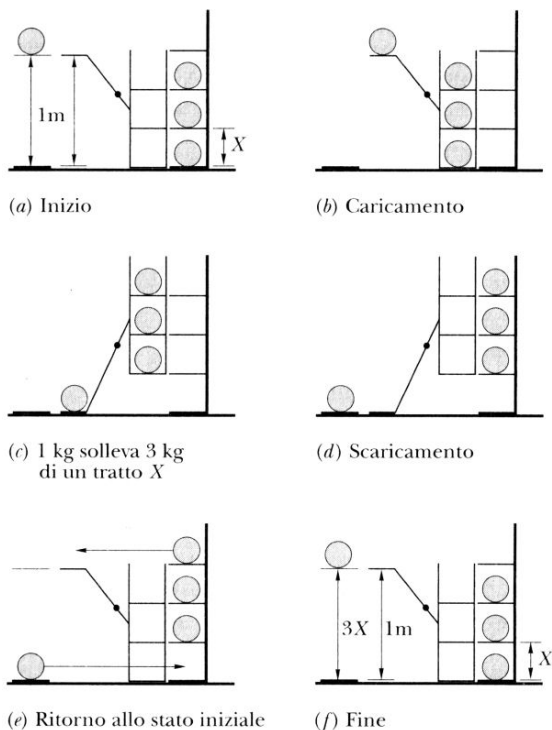


Fig. 14 - Una macchina reversibile.

Ma la cosa strana è che, in un certo senso, due palle non sono state sollevate per niente, perché, dopotutto, anche all'inizio avevamo due

palle sul secondo e terzo ripiano. L'effetto complessivo è stato di sollevare *una* palla di un'altezza $3X$. Ora, se $3X$ è più di un metro, potremmo abbassare la palla e riportare la macchina alle condizioni iniziali (f), e ricominciare da capo, realizzando il moto perpetuo. Quindi $3X$ è minore o uguale a $1m$. Allo stesso modo, facendo funzionare la macchina alla rovescia possiamo dimostrare che $1m$ è minore o uguale a $3X$, e quindi scopriamo, con il puro e semplice ragionamento, la legge che $X = \frac{1}{3}m$. La generalizzazione è ovvia: se 1 kg scende di una certa distanza mettendo in funzione una macchina reversibile, la macchina può sollevare n kg a un'altezza pari a questa distanza diviso n . Un altro modo di esprimere il risultato è che 3 kg per l'altezza (che nel nostro caso è X) è uguale a 1 kg per la lunghezza del tratto di caduta (che nel nostro caso è 1 m). Se prendiamo tutti i pesi e li moltiplichiamo per l'altezza a cui si trovano ora, facciamo funzionare la macchina, e alla fine moltiplichiamo di nuovo ogni peso per l'altezza a cui si trova e sommiamo i risultati, il risultato sarà lo stesso. (Dobbiamo generalizzare l'esempio dal caso in cui si muove un solo peso a quello in cui abbassando un peso ne solleviamo diversi, ma è semplice).

La somma dei pesi per le altezze si chiama *energia potenziale gravitazionale*: l'energia U che un oggetto ha in virtù della sua posizione nello spazio, relativa alla Terra. L'espressione dell'energia gravitazionale di un corpo, quindi, purché non siamo a quote troppo elevate (la forza diminuisce con l'altezza), è

[3]

$$U=PH$$

dove P è il peso del corpo e H la sua altezza da terra.

È un bellissimo modo di ragionare. Il solo problema è che potrebbe essere sbagliato. (Dopotutto, la natura non deve per forza seguire i nostri ragionamenti). Per esempio, il moto perpetuo potrebbe anche essere possibile. Alcune ipotesi potrebbero essere sbagliate, o magari c'è un errore di logica. Quindi bisogna sempre controllare, e in effetti *sperimentalmente* risulta esatto. In generale, l'energia che dipende dalla posizione di un oggetto relativa a qualche altro si chiama *energia potenziale*; in questo caso particolare, naturalmente, si tratterà di energia potenziale gravitazionale. Se si tratta di compiere un lavoro contrastando forze elettriche invece che gravitazionali, di «liberare» cariche attratte da altre cariche, l'energia si chiama

energia potenziale elettrica. Il principio generale è che la variazione di energia (ΔE) è data dalla forza (F) moltiplicata per la distanza (s) su cui la forza agisce:

$$[4] \qquad \Delta E = Fs .$$

Avremo più volte occasione di tornare su questi tipi di energia.

Il principio di conservazione dell'energia è molto utile per prevedere cosa succederà in diverse circostanze. Alle scuole superiori abbiamo imparato numerose leggi che riguardano leve e pulegge; possiamo ora constatare che queste «leggi» sono tutte la stessa cosa, e non era poi necessario imparare a memoria settantacinque regole diverse per capire come funzionano. Un semplice esempio è dato nella figura 15, dove vediamo un piano inclinato privo di attrito, in pratica un triangolo rettangolo, i cui lati misurano 3, 4 e 5 metri.

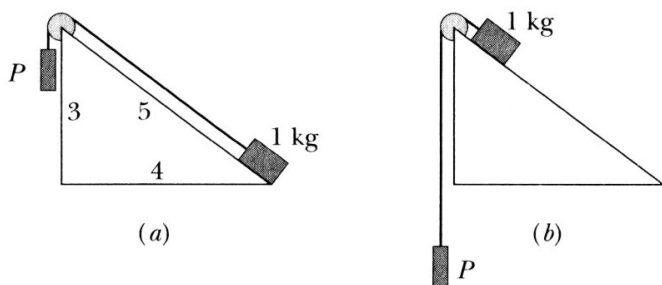


Fig. 15 - Piano inclinato.

Sosteniamo il peso di 1 kg sul piano inclinato con una puleggia, e all'altra estremità della puleggia sospendiamo un peso P . Vogliamo sapere quanto deve pesare P per bilanciare il peso sul piano inclinato. Come facciamo a scoprirlo? Se il sistema è perfettamente in equilibrio è reversibile, si può muovere avanti e indietro, e quindi possiamo considerare la situazione seguente. Nelle condizioni iniziali (a), il peso di 1 kg è in fondo e il peso P è in cima; quando P scivola giù in modo reversibile, abbiamo 1 kg in cima e P disceso della lunghezza del piano inclinato, come in (b), ossia 5 m. Abbiamo sollevato 1 kg di tre metri e abbassato P kg di cinque. Quindi $P=3/5$ kg. È da notare che abbiamo dedotto questo risultato dal principio di conservazione dell'energia, e non dalle componenti delle forze. L'astuzia però è relativa. Lo stesso risultato si può dedurre in un modo ancora più brillante, scoperto da Stevino e scritto sulla sua

tomba. La figura 16 mostra che il peso deve essere per forza $\frac{3}{5}$ kg, perché la catena non gira intorno.

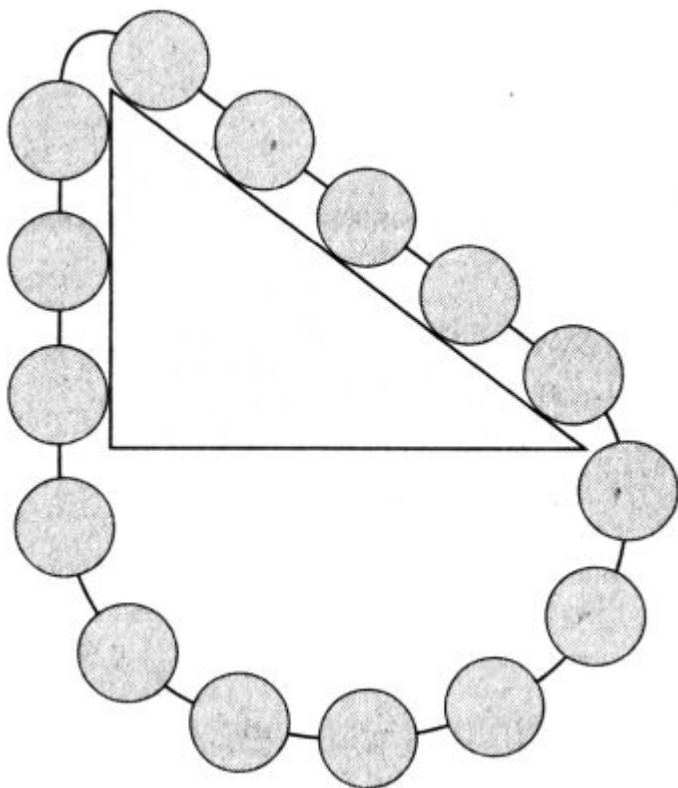


Fig. 16 - L'epitaffio di Stevino.

È evidente che la parte inferiore della catena sta in equilibrio da sola, così che l'azione dei cinque pesi su un lato deve bilanciare quella dei tre pesi sull'altro, o comunque nel rapporto tra i due lati. Guardando questo disegno si vede che P deve essere $\frac{3}{5}$ kg. (Se riuscirete ad avere un epitaffio così sulla vostra tomba, potrete ritenervi soddisfatti).

Illustreremo ora il principio di conservazione dell'energia con un problema più complicato: il martinetto a vite mostrato nella figura 17. Per girare la vite, che ha 10 passi per centimetro, si usa un'asta lunga 20 cm. Vorremmo sapere che forza bisogna esercitare sull'asta per sollevare una tonnellata. Se vogliamo sollevare la tonnellata di 1

cm, per esempio, bisogna far girare l'asta dieci volte; quando l'asta fa un giro la sua estremità percorre circa 126 cm, quindi per sollevare la tonnellata di 1 cm deve percorrere 1260 cm.

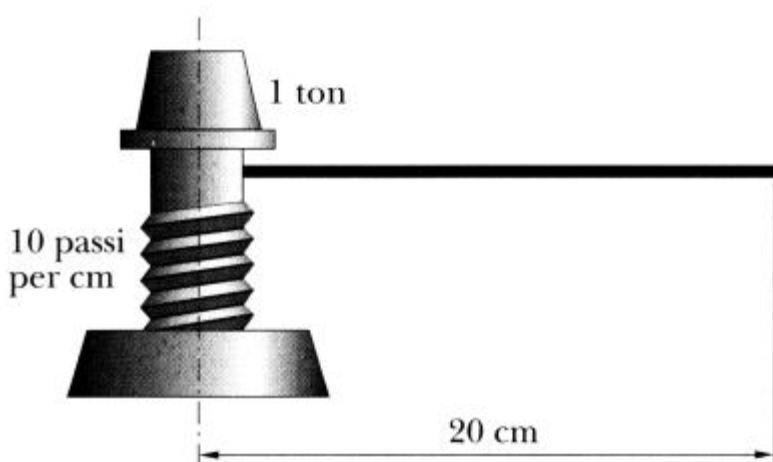


Fig. 17 - Un martinetto a vite.

Usando una serie di pulegge potremmo far percorrere 1260 cm all'estremità dell'asta abbassando un peso P di 1260 cm, e per sollevare 1000 kg di 1 cm P deve essere $(1000 \text{ kg}) \times (1 \text{ cm}) / (1260 \text{ cm}) = 0,8 \text{ kg}$ circa. Questo è un risultato della conservazione dell'energia.

Consideriamo ora l'esempio, più complicato, della figura 18. Una sbarra lunga 8 m è appoggiata a un'estremità. In mezzo alla sbarra c'è un peso di 60 kg, e a 2 m dal punto d'appoggio c'è un peso di 100 kg. Trascurando il peso della sbarra, quale dovrà essere lo sforzo per sostenere l'estremità della sbarra in modo da mantenere il sistema in equilibrio? Supponiamo di mettere una puleggia all'estremità e di appendervi un peso. Quanto deve essere il peso P per bilanciare tutto? Ragioniamo in questo modo: se P si abbassa di una distanza qualsiasi (supponiamo per comodità 40 cm) di quanto si alzano i pesi sulla sbarra?

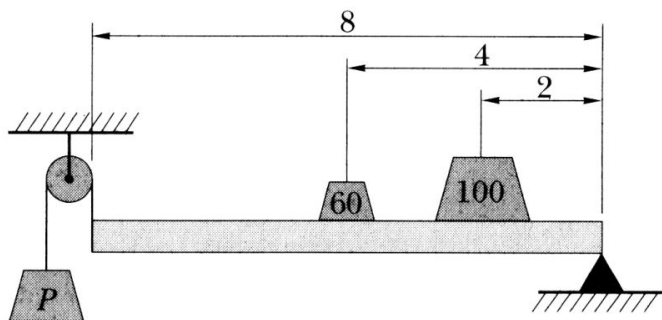


Fig. 18 - Asta caricata sostenuta a un estremo.

Il centro della sbarra si alza di 20 cm, e il punto su cui poggia il peso di 100 kg si alza di 10 cm. Quindi il principio che la somma dei pesi per gli spostamenti verticali non cambia ci dice che il peso P per 40 cm in giù, più 60 kg per 20 cm in su, più 100 kg per 10 cm in su deve dare zero:

$$[5] \quad -40P + 20 \times 60 + 10 \times 100 = 0, \text{ cioè } P = 55 \text{ kg.}$$

Quindi dobbiamo mettere un peso di 55 kg per mantenere l'asta in equilibrio. In questo modo possiamo dedurre le leggi dell'«equilibrio»: la statica delle strutture complicate di ponti e così via. Questo procedimento si chiama *principio dei lavori virtuali*, perché per applicarlo dobbiamo immaginare che la struttura si muova un po', anche se in realtà non si muove, o magari è perfino inamovibile. Immaginiamo un piccolo movimento per applicare il principio di conservazione dell'energia.

Energia cinetica

Per illustrare un altro tipo di energia consideriamo un pendolo (fig. 19). Se spostiamo la massa da un lato e la lasciamo andare, oscillerà avanti e indietro. E la sua altezza diminuisce andando dai lati verso il centro; dove va a finire l'energia potenziale? Quando il pendolo è nel punto più basso l'energia gravitazionale è sparita, deve avere assunto un'altra forma; infatti il pendolo risale di nuovo. Evidentemente ciò

che fa risalire il pendolo è il suo *moto*; dobbiamo trovare un'espressione per l'energia del moto. Ricordando i nostri ragionamenti sulle macchine reversibili, vediamo facilmente che quando il pendolo, oscillando, si trova nel punto più basso ci deve essere una quantità di energia che gli permetta di risalire a una certa altezza, e che non ha niente a che fare con il meccanismo per cui risale, o con la traiettoria che segue.

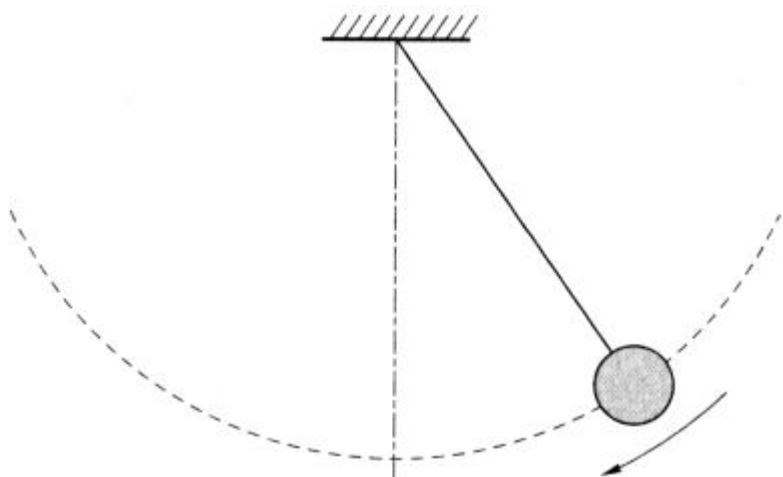


Fig. 19 - Pendolo.

Quindi abbiamo un'equivalenza simile a quella scritta per i blocchi per le costruzioni. Abbiamo un'altra forma per rappresentare l'energia, che è facile da esplicitare. L'energia cinetica, in basso, è uguale al peso per l'altezza che potrà raggiungere a seconda della sua velocità: $E_{\text{cin}} = PH$. Ora abbiamo bisogno di una formula che esprima l'altezza in funzione di qualcosa che ha a che fare con il moto. Se lanciamo qualcosa in alto a una certa velocità raggiungerà una certa altezza; non sappiamo ancora quanto vale, ma dipende dalla velocità secondo una certa formula. Allora per trovare un'espressione per l'energia cinetica di un oggetto che si muove con velocità V dobbiamo calcolare l'altezza che potrebbe raggiungere e moltiplicarla per il peso. L'espressione che si trova è la seguente:

[6]

$$E_{\text{cin}} = PV^2/2g.$$

Naturalmente, il fatto che il moto abbia energia non ha niente a che vedere con il fatto che siamo in un campo gravitazionale. Non importa da dove viene il moto: questa formula è generale e vale per diverse velocità. Sia la [3] che la [6] sono formule approssimate: la prima è inesatta quando l'altezza diventa grande, così grande che la gravità diminuisce; la seconda richiede una correzione relativistica ad alte velocità. Tuttavia, quando finalmente avremo la formula esatta dell'energia, la legge di conservazione dell'energia sarà esatta.

Altre forme di energia

Possiamo continuare in questo modo a descrivere altre forme di energia. Prima di tutto consideriamo l'energia elastica. Se tendiamo una molla dobbiamo compiere un lavoro, tanto è vero che dopo averla allungata la possiamo usare per sollevare pesi. Quindi quando la molla è in tensione ha la possibilità di compiere lavoro. Se sommiamo i pesi per le altezze i conti non tornano: dobbiamo aggiungere qualcosa per tenere conto del fatto che la molla è in tensione, l'energia elastica, appunto. Quanto vale? Se lasciamo andare, la molla va avanti e indietro e ogni volta che si avvicina alla posizione di equilibrio, l'energia elastica si trasforma progressivamente in energia cinetica. (C'è anche dell'energia gravitazionale in gioco, ma possiamo eliminarla facendo l'esperimento orizzontalmente). Si continua così finché pian piano... aha! abbiamo barato fin dall'inizio, facendo finta che le macchine siano reversibili, e aggiungendo o togliendo piccoli pesi per metterle in funzione, ma alla fine siamo costretti ad ammettere che le macchine prima o poi si fermano. Dov'è andata a finire l'energia quando la molla smette di andare avanti e indietro? Questa domanda ci porta a considerare un'altra forma di energia: l'energia termica. All'interno di una molla, o di una leva, ci sono cristalli costituiti da molti atomi, e se sistemiamo le cose con grande cura e delicatezza possiamo fare in modo che quando una cosa ruota o si muove a contatto con un'altra gli atomi non vengano sollecitati e le loro vibrazioni non aumentino. Ma bisogna stare molto attenti. Di solito quando due oggetti si muovono l'uno a contatto dell'altro ci sono scontri e scosse dovuti alle irregolarità del materiale, e gli atomi cominciano a vibrare più

intensamente all'interno. Così perdiamo di vista una parte dell'energia: gli atomi vibrano all'interno in modo casuale e confuso quando il moto rallenta. È ancora energia cinetica, d'accordo, ma non è associata ad alcun moto visibile. Che fantasia! Come facciamo a sapere che c'è dell'energia cinetica? In effetti con un termometro si può verificare che la molla è più calda, e c'è un reale aumento di energia cinetica all'interno. Chiamiamo questa forma di energia *energia termica*, anche se in realtà sappiamo che non si tratta di una forma nuova, è solo energia cinetica del moto interno. (Una delle difficoltà, in questi esperimenti con la materia effettuati su scala macroscopica, è che non si riesce veramente a dimostrare la conservazione dell'energia e non si possono realmente costruire macchine reversibili, perché quando si muovono grossi blocchi di materia gli atomi vengono disturbati, e quindi a livello atomico entra un certo ammontare di movimento casuale. Non possiamo vederlo, ma possiamo misurarlo con un termometro, ecc.).

Ci sono molte altre forme di energia, e naturalmente non possiamo descriverle ora nei particolari. C'è l'energia elettrica, che ha a che fare con l'attrazione e la repulsione delle varie cariche; l'energia radiante, l'energia della luce, che sappiamo essere una forma di energia elettrica perché la luce si può rappresentare sotto forma di oscillazioni del campo elettromagnetico. Poi troviamo l'energia chimica, quella che viene rilasciata nelle reazioni chimiche. In effetti, l'energia elastica è in un certo senso simile all'energia chimica, perché l'energia chimica dipende dall'attrazione degli atomi tra loro, e quindi è energia elastica. Oggi come oggi la nostra comprensione di questo fenomeno è la seguente. L'energia chimica è costituita da due componenti: l'energia cinetica degli elettroni all'interno degli atomi, e l'energia elettrica di interazione tra elettroni e protoni. Poi arriviamo all'energia nucleare, cioè quella associata alla disposizione delle particelle all'interno del nucleo; per questa energia esiste un'espressione, ma non conosciamo le leggi fondamentali. Sappiamo che non è elettrica, non è gravitazionale e nemmeno puramente chimica, ma non sappiamo esattamente cosa sia. Sembra essere una forma diversa di energia. Infine, associata alla teoria della relatività, troviamo una modifica delle leggi dell'energia cinetica, o come la volete chiamare, per cui questa si combina con un'altra forma di energia chiamata *energia di massa*. Un oggetto ha energia per il solo fatto che esiste. Se un positrone e un elettrone, che se ne stanno lì senza fare niente (dimentichiamoci della gravità e tutto il resto), si

avvicinano e si annichilano, si libera una quantità precisa di energia radiante, che si può calcolare in anticipo. Basta sapere la massa degli oggetti. Non dipende dalla natura dell'oggetto: se facciamo scomparire una cosa, otteniamo una certa quantità di energia. La formula fu scoperta da Einstein: $E=mc^2$.

Da tutto questo discorso si deduce che la legge di conservazione dell'energia è incredibilmente utile per analizzare fenomeni, come abbiamo illustrato in qualche esempio, senza sapere tutte le formule. Se avessimo l'espressione per ogni tipo di energia potremmo analizzare come si svolgono certi processi senza dover entrare nei particolari. Per questo le leggi di conservazione sono tanto interessanti. Ci si può chiedere, naturalmente, se vi siano, in fisica, altre leggi di conservazione. Ce ne sono altre due analoghe alla conservazione dell'energia: una è la conservazione della quantità di moto, l'altra la conservazione del momento della quantità di moto, detto anche momento angolare. (Questi argomenti verranno trattati più in dettaglio nel seguito). In ultima analisi, comunque, non comprendiamo fino in fondo le leggi di conservazione. Non capiamo la conservazione dell'energia, perché l'energia non è la somma di tante piccole quantità. Magari avete sentito dire che i fotoni arrivano a pacchetti e che l'energia di un fotone è la costante di Planck per la frequenza. Questo è vero, ma dato che la frequenza della luce può essere qualsiasi, non c'è nessuna legge che ci dica quanto vale l'energia. Al contrario dei blocchi di Pierino, qualunque ammontare è possibile, per quanto ne sappiamo ora. Quindi questa energia non è qualcosa che abbia un valore definito, al momento: è solo una quantità matematica, e questo stato di cose è astratto e molto peculiare. In meccanica quantistica la conservazione dell'energia è strettamente legata a un'altra proprietà importante del mondo reale: *niente dipende dal tempo assoluto*. Possiamo eseguire un esperimento in un dato momento, e rifarlo in un momento successivo, e il risultato sarà lo stesso. Non sappiamo se questo sia del tutto vero, ma se ipotizziamo che lo sia, e aggiungiamo i principi della meccanica quantistica, allora possiamo dedurre il principio di conservazione dell'energia. È un fatto sottile e molto interessante, e non è facile da spiegare. Anche le altre leggi di conservazione sono legate tra loro. In meccanica quantistica, la conservazione della quantità di moto è collegata con l'ipotesi che ovunque si esegua l'esperimento i risultati saranno identici. L'indipendenza spaziale ha a che fare con la conservazione della quantità di moto e l'indipendenza temporale

con la conservazione dell'energia; infine, anche ruotare l'apparato sperimentale non dovrebbe comportare differenze, e così l'invarianza del mondo rispetto all'orientamento angolare è collegata alla *conservazione del momento angolare*. Oltre a queste ci sono altre leggi di conservazione, che sono esatte per quanto ne sappiamo fino a oggi, e sono molto più facili da capire perché sono di natura simile alla conservazione dei blocchi per le costruzioni, che si possono contare.

La prima è la *conservazione della carica*, e significa semplicemente che se si sommano le cariche positive e si sottraggono quelle negative, il numero risultante non cambia mai. Si può eliminare una carica negativa con una positiva, ma non si può creare un eccesso di cariche positive o negative. Altre due leggi sono analoghe a questa; una è la *conservazione dei barioni*. C'è un certo numero di strane particelle (i neutroni e i protoni tra queste) chiamate *barioni*. In qualunque reazione, di qualsiasi natura, se contiamo quanti barioni entrano nel processo, il loro numero alla fine sarà esattamente lo stesso.⁵ L'altra legge è la *conservazione dei leptoni*, che sono un gruppo di particelle formato da elettroni, mesoni μ e neutrini. Esiste un antielettrone, chiamato *positrone*, che conta come -1 leptone. Contando il numero di leptoni in una reazione si vede che il numero iniziale e finale non cambia, almeno per quanto ne sappiamo al momento.

Ci sono sei leggi di conservazione, tre sono complesse e riguardano lo spazio e il tempo, e tre sono semplici e riguardano il contare certe cose. Riguardo alla conservazione dell'energia, bisogna osservare che l'energia *disponibile* è un'altra faccenda; per esempio gli atomi dell'acqua del mare vibrano e si muovono, perché l'acqua è a una certa temperatura, ma è impossibile organizzarli e sfruttare quell'energia senza prendere energia altrove. Cioè, anche se sappiamo per certo che l'energia si conserva, quella disponibile per l'utilità dell'uomo non si conserva così facilmente. Le leggi che governano la quantità di energia disponibile sono quelle della *termodinamica*, e coinvolgono un concetto chiamato *entropia* per i processi termodinamici irreversibili. Infine, consideriamo il problema di dove trovare fonti di energia oggi. L'energia che utilizziamo proviene dal Sole, dalla pioggia, dal carbone, dall'uranio e dall'idrogeno. Il Sole è responsabile sia della pioggia che del carbone, quindi tutte queste fonti si riconducono al Sole. L'energia si conserva, ma la natura non sembra interessarsene: ne libera moltissima dal Sole, ma sulla Terra

ne arriva solo una parte su due miliardi. La natura conserva l'energia, ma non gliene importa niente: ne spreca moltissima, in tutte le direzioni. Noi umani abbiamo già trovato il modo di ottenere energia dall'uranio, possiamo anche ricavarla dall'idrogeno, ma solo in modo pericoloso, attraverso esplosioni. Se potessimo controllarla nelle reazioni termonucleari, avremmo che l'energia proveniente da 10 litri d'acqua al secondo sarebbe pari a tutta la potenza elettrica generata negli Stati Uniti. Con 600 litri al minuto avremmo tutta l'energia usata oggi negli Stati Uniti! Perciò sta ai fisici scoprire il modo di liberarci dal bisogno di energia. Si può fare.

V

LA TEORIA DELLA GRAVITAZIONE

Moti planetari

In questo capitolo discuteremo una delle più grandi generalizzazioni compiute dalla mente umana; ma mentre ammiriamo compiaciuti la mente umana, dovremmo anche poter sostare in riverente ammirazione dinanzi a una natura che segue una legge tanto elegante e semplice in modo così completo e generale: la legge di gravitazione. Questa legge dice che ogni corpo nell'universo attrae ogni altro con una forza proporzionale alla massa di ognuno e che varia inversamente al quadrato della distanza che li separa. Questo enunciato si può esprimere matematicamente con l'equazione:

$$F = G \frac{mm'}{r^2}$$

Se a questo aggiungiamo il fatto che un corpo reagisce a una forza accelerando nella direzione della forza con un'intensità inversamente proporzionale alla sua massa, avremo tutto ciò che occorre a un abile matematico per dedurre tutte le conseguenze di questi due principi. Tuttavia, non essendo voi tutti abili matematici, discuteremo le conseguenze nei particolari, invece di lasciarvi con questi due principi nudi e crudi. Racconteremo quindi brevemente la storia della scoperta, ed esamineremo alcune sue implicazioni, gli effetti che ha avuto sulla storia della scienza, i misteri che implica, e alcuni aggiustamenti della legge ad opera di Einstein, nonché i suoi rapporti con le altre leggi della fisica. La storia comincia con le osservazioni degli antichi del moto dei pianeti in relazione alle stelle, e infine con il riconoscimento del fatto, riscoperto più tardi da Copernico, che i pianeti girano intorno al Sole. Per capire esattamente *come* si muovono intorno al Sole ci volle un po' più di lavoro. All'inizio del quindicesimo secolo si dibatté a lungo intorno alla questione se effettivamente i pianeti ruotassero intorno al Sole o no.

Tycho Brahe propose una soluzione diversa da ogni altra suggerita fino ad allora: la sua idea fu che tutte queste diatribe sarebbero state risolte se si fosse riusciti a misurare accuratamente la posizione dei pianeti in cielo. Con misure molto precise si sarebbe potuto capire come si muovono i pianeti e stabilire una volta per tutte la giustezza dell'uno o dell'altro punto di vista. Fu un'idea rivoluzionaria: per scoprire qualcosa, è meglio eseguire esperimenti accurati che impegnarsi in profonde discussioni filosofiche. Fedele a questo principio, Brahe studiò la posizione dei pianeti per molti anni nel suo osservatorio sull'isola di Hven, vicino a Copenaghen; produsse tavole voluminose, studiate dopo la sua morte dal matematico Keplero, che da quei dati ricavò alcune leggi eleganti e notevoli, ma semplici, riguardo al moto planetario.

Le leggi di Keplero

Prima di tutto, Keplero scoprì che ogni pianeta gira intorno al Sole lungo un'ellisse, di cui il Sole occupa uno dei fuochi. Un'ellisse non è una linea ovale qualsiasi, è una curva precisa e ben definita che si può disegnare usando due chiodi, uno in ogni fuoco, un tratto di spago e una matita; da un punto di vista più matematico, è il luogo dei punti tali che la somma delle loro distanze dai fuochi sia costante. O, se volete, è un cerchio schiacciato (fig. 20).

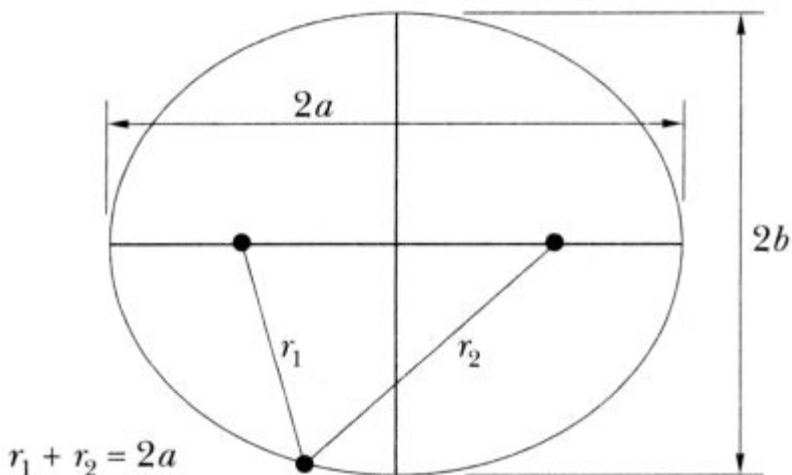


Fig. 20 - Un'ellisse.

La seconda osservazione di Keplero fu che i pianeti non girano con velocità uniforme, ma si muovono più in fretta quando sono più vicini al Sole e più lentamente quando sono lontani; precisamente nel modo descritto qui di seguito. Osserviamo un pianeta in due momenti successivi, diciamo a una settimana di distanza, e tracciamo le rette (raggi vettori) dal Sole al pianeta in corrispondenza delle due posizioni osservate; l'arco orbitale e i due raggi vettori delimitano una certa area piana (l'area ombreggiata in fig. 21).

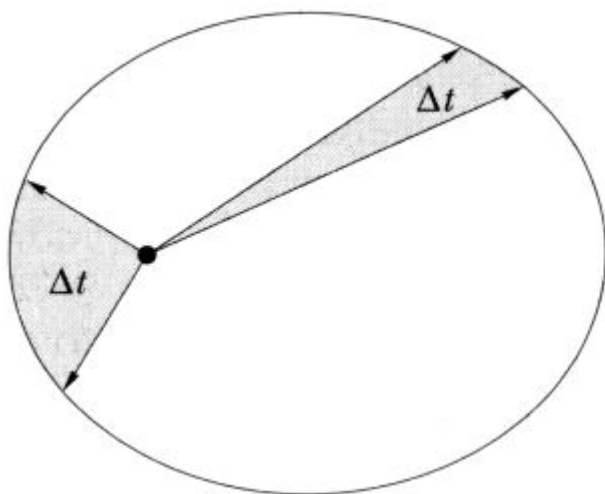


Fig. 21 - La legge delle aree di Keplero.

Se facciamo altre due osservazioni (di nuovo a una settimana di distanza l'una dall'altra) in un diverso periodo, quando, ad esempio, il pianeta è più lontano dal Sole, l'area risultante è esattamente la stessa di prima. Quindi, secondo questa legge, per ogni pianeta la velocità orbitale dev'essere tale che il raggio vettore descriva aree uguali in tempi uguali.

Infine, diversi anni dopo, Keplero scoprì una terza legge che non riguardava il moto di un solo pianeta intorno al Sole, ma metteva in relazione i moti dei vari pianeti tra loro. Chiamando *periodo orbitale* il tempo che un pianeta impiega a compiere un giro completo intorno al Sole, la legge dice che il rapporto tra il quadrato del periodo orbitale e il cubo della distanza media dal Sole è lo stesso per tutti i pianeti del sistema solare. Più semplicemente, se l'orbita dei pianeti fosse circolare (e lo è quasi), il tempo necessario a compiere un giro completo sarebbe proporzionale al raggio elevato a potenza $3/2$, la costante di proporzionalità essendo la stessa per tutti i pianeti. Quindi le tre leggi di Keplero sono:

- 1) Ogni pianeta descrive intorno al Sole un'ellisse, di cui il Sole occupa uno dei fuochi.
- 2) Il raggio vettore dal Sole al pianeta descrive aree uguali in tempi uguali.
- 3) Il rapporto tra il quadrato del periodo orbitale e il cubo della distanza media dal Sole è costante: $T^2/r^3 = \text{costante}$.

Sviluppo della dinamica

Mentre Keplero scopriva queste leggi, Galileo studiava le leggi del moto. Il problema era: che cosa fa muovere i pianeti? (A quel tempo, una delle teorie più in voga diceva che i pianeti si muovono sospinti da angeli invisibili, che battendo le ali li mandano avanti. Vedremo che questa teoria necessita di qualche modifica: per far muovere i pianeti gli angeli invisibili devono muoversi in un'altra direzione, e inoltre non hanno ali. Per il resto, la teoria è abbastanza simile). Galileo scoprì un fatto veramente notevole riguardo al moto,

fondamentale al fine di capire queste leggi. Si tratta del *principio di inerzia*: se un oggetto è in movimento, e niente lo tocca e niente lo disturba, continua a muoversi per sempre, viaggiando a velocità uniforme in linea retta. (Perché? Non si sa. Però è così). Newton perfezionò il concetto: per cambiare in qualsiasi modo una velocità c'era bisogno di una *forza*. Se il corpo accelera, vuol dire che è stata applicata una forza nella direzione del moto. D'altra parte, se cambia direzione, vuol dire che è stata applicata una forza laterale. Newton quindi aggiunse l'idea che è necessaria una forza per cambiare la velocità o la *direzione* del moto di un corpo. Per esempio, se si attacca una pietra a una corda e la si fa girare in cerchio sopra la testa, bisogna esercitare una forza per tenerla su una traiettoria circolare. Bisogna *tirare* la corda e la ragione è che, pur se la velocità della pietra, mentre gira, non cambia in grandezza, cambia la sua direzione; deve esserci quindi una forza che tira perennemente verso l'interno, e questa è proporzionale alla massa. Infatti la legge è che l'accelerazione prodotta dalla forza è inversamente proporzionale alla massa, ovvero la forza è proporzionale alla massa. Maggiore la massa di un oggetto, maggiore la forza richiesta per imprimergli una certa accelerazione. (La massa si può misurare legando successivamente pietre diverse all'estremità della corda e facendole girare in cerchio alla stessa velocità. In questo modo si scopre che ci vuole più o meno forza, e oggetti di massa maggiore richiedono più forza). L'idea brillante che risulta da queste considerazioni è che per mantenere un pianeta in orbita *non c'è bisogno di alcuna forza tangenziale* (cioè gli angeli non devono volare tangenzialmente), perché il pianeta seguirebbe comunque questa direzione. Se non ci fosse nulla a disturbarlo, partirebbe per la tangente, e viaggierebbe in linea retta. Ma il moto reale devia da questa retta, e la deviazione è essenzialmente *perpendicolare* al moto, e non nella direzione del moto. In altre parole, a causa del principio di inerzia, la forza necessaria per controllare il moto di un pianeta attorno al Sole non è una forza diretta *attorno* al Sole, ma *verso* il Sole. E se c'è una forza verso il Sole, il Sole stesso potrebbe essere l'angelo, naturalmente!

La legge di gravitazione di Newton

Data la sua migliore comprensione della teoria del moto, Newton giustamente valutò che il Sole potesse essere la sede o l'organizzazione delle forze che governano il moto dei pianeti. Newton dimostrò che il fatto stesso che aree uguali sono coperte in tempi uguali è precisamente un'indicazione che tutte le deviazioni sono esattamente *radiali*, cioè che la legge delle aree è conseguenza diretta del fatto che tutte le forze sono dirette *verso il Sole*.

Analizzando la terza legge di Keplero si può inoltre dedurre che più il pianeta è lontano, più deboli sono le forze. Se due pianeti sono a distanza diversa dal Sole, l'analisi dimostra che la forza è inversamente proporzionale al quadrato della distanza. Mettendo insieme questi due risultati Newton giunse alla conclusione che ci deve essere una forza inversamente proporzionale al quadrato della distanza, nella direzione della retta che congiunge i due oggetti. Newton, naturalmente portato alle grandi generalizzazioni, ipotizzò che questa relazione non riguardasse solo il Sole e i pianeti, ma si applicasse molto più in generale. Per esempio, già era noto che il pianeta Giove ha dei satelliti che gli girano intorno, proprio come la Luna gira intorno alla Terra, e Newton era convinto che ogni pianeta trattenga le sue lune in orbita per mezzo di una forza. Già conosceva la forza che tiene noi attaccati alla Terra, e quindi avanzò l'ipotesi che essa sia universale: *ogni cosa attira ogni altra cosa*. A questo punto sorgeva il problema di capire se l'attrazione che la Terra esercita sui suoi abitanti fosse «la stessa» esercitata sulla Luna, cioè inversa al quadrato della distanza. Se un corpo sulla superficie della Terra, lasciato cadere, cade di 4,9 metri nel primo secondo, di quanto «cade» la Luna nello stesso tempo? Si potrebbe obiettare che la Luna non cade affatto; ma se non ci fosse alcuna forza in azione la Luna partirebbe per la tangente in linea retta, quindi in realtà la Luna cade rispetto alla posizione in cui si troverebbe se su di essa non agisse alcuna forza. Dal raggio dell'orbita (384000 km) e dal tempo che ci mette a girare intorno alla Terra (27,3 giorni) si può calcolare di quanto si sposta la Luna in un secondo, e poi di quanto cade in un secondo:⁶ all'incirca 1,36 mm. Questo torna quasi perfettamente con la legge dell'inverso del quadrato, perché il raggio della Terra misura 6380 chilometri, e quindi, se una cosa a 6380 chilometri di distanza dal centro della Terra cade di 4,9 metri in un secondo, una cosa a 380000 km, cioè circa 60 volte tanto, dovrebbe cadere solo $1/3600$ di 4,9 metri, che sono proprio circa 1,36 mm. Cercando di verificare la sua teoria della gravitazione, Newton fece

calcoli simili con grande accuratezza e trovò discrepanze così grandi da vedersi costretto a concludere che la sua teoria veniva contraddetta dalla realtà, e quindi non pubblicò i suoi risultati. Sei anni più tardi una nuova misurazione delle dimensioni della Terra dimostrò che la distanza tra Terra e Luna utilizzata fino ad allora dagli astronomi era sbagliata. Quando Newton lo venne a sapere rifece i suoi calcoli con i numeri giusti e ottenne risultati in perfetto accordo con la sua teoria.

Questa idea della Luna che «cade» non è molto chiara, perché, evidentemente, non è che si avvicini alla Terra. L'idea è sufficientemente interessante da meritare qualche spiegazione in più: la Luna «cade» nel senso che devia dalla linea retta che seguirebbe se non ci fossero forze in gioco. Facciamo un esempio sulla superficie della Terra. Un oggetto, lasciato cadere, cadrà di 4,9 metri nel primo secondo. Lanciato *orizzontalmente*, cadrà ancora di 4,9 metri; anche se si muove orizzontalmente, in verticale la sua posizione varierà allo stesso modo. Nella figura 22 vediamo un apparato che dimostra questo fatto. Una palla rotola sul binario inclinato e quando lo abbandona va un po' in avanti, cadendo. Alla stessa altezza c'è una palla in procinto di cadere, e un interruttore elettrico che ne provoca la caduta proprio nell'istante in cui la prima palla abbandona il binario. Le due palle si scontrano a mezz'aria, a testimonianza del fatto che raggiungono la stessa quota nello stesso momento. Una pallottola sparata orizzontalmente può coprire una lunga distanza in un secondo, magari mezzo chilometro, ma scenderà sempre di 4,9 metri, se la mira è orizzontale. Cosa succede se spariamo una pallottola sempre più veloce?

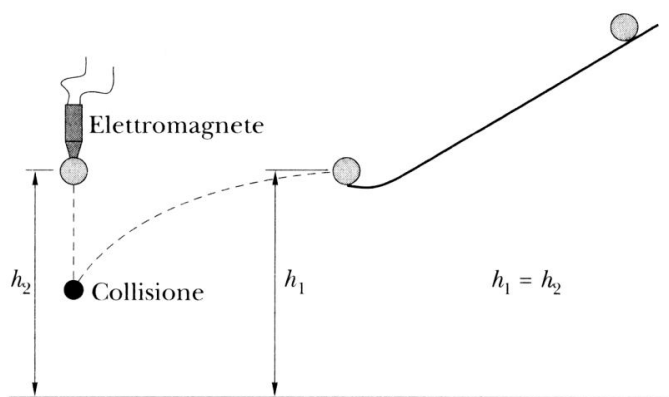


Fig. 22 - Apparato che dimostra l'indipendenza tra il moto orizzontale e quello verticale.

Non dimentichiamoci che la Terra è rotonda. Se il proiettile ha sufficiente velocità iniziale, allora quando sarà caduto di 4,9 metri potrebbe trovarsi alla stessa altezza dal suolo. Com'è possibile? Per cadere cade, ma la superficie della Terra è curva, e quindi cade «attorno» alla Terra. La domanda ora è: che distanza deve percorrere, in un secondo, affinché la Terra si trovi 4,9 metri sotto il suo orizzonte? Nella figura 23 vediamo la Terra e la traiettoria tangenziale, in linea retta, che la pallottola seguirebbe se non ci fossero forze in gioco. Ora, se usiamo uno di quei fantastici teoremi di geometria che dice che la nostra tangente è media proporzionale tra le due parti di diametro tagliate da una corda di uguale lunghezza, vediamo che la distanza orizzontale percorsa è media proporzionale tra i 4,9 metri della caduta e i 12760 chilometri del diametro della Terra (meno 4,9 metri, che rispetto al diametro della Terra sono trascurabili).

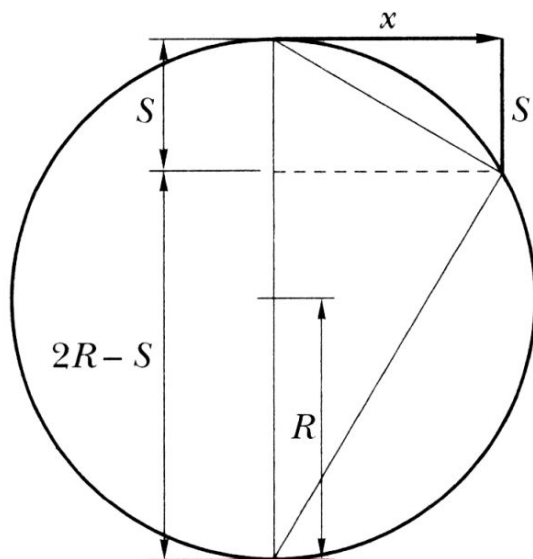


Fig. 23 - Accelerazione centripeta di un'orbita circolare. Dalla geometria piana si trova $x/S = (2R-S)/x \approx 2R/x$, dove R è il raggio della Terra (6380 km), x è la distanza percorsa orizzontalmente in un secondo, e S è il tratto di caduta in un secondo (4,9 m).

Quindi la proporzione è $4,9 : x = x : 12760000$, da cui risulta che x è uguale alla radice quadrata di $4,9 \times 12760000$, ossia circa 8000

metri. Quindi vediamo che, se la pallottola viaggia a 8 chilometri al secondo, continuerà a cadere verso la Terra alla velocità di 4,9 metri al secondo, ma non si avvicinerà mai, perché la Terra si allontana sotto di lei, curvandosi. È così che il signor Gagarin è riuscito a rimanere nello spazio girando per 40000 chilometri attorno alla Terra alla velocità di circa 8 chilometri al secondo. (In realtà girò un po' più a lungo, perché era più in alto). Ogni grande scoperta è utile solo se quello che la nuova legge riesce a prevedere supera le informazioni utilizzate. Newton usò la seconda e la terza legge di Keplero per dedurre la sua legge di gravitazione. Che cosa riuscì a prevedere? Prima di tutto la sua analisi del moto della Luna fu una previsione, perché collegò la caduta degli oggetti sulla superficie della Terra con la caduta della Luna. Secondo problema: l'orbita è un'ellisse? Vedremo in seguito come sia possibile calcolare il moto esattamente, e in effetti dimostrare che dev'essere un'ellisse, quindi non è necessario nient'altro per spiegare la prima legge di Keplero. In questo modo Newton fece la sua prima importante previsione.

La legge di gravitazione spiega molti fenomeni prima incomprensibili. Per esempio: è l'attrazione della Luna sulla Terra a causare le maree, fino ad allora misteriose. La Luna attira l'acqua in su e crea la marea; altri, prima di Newton, ci avevano pensato, ma non essendo altrettanto intelligenti pensavano che in base a quella teoria ci sarebbe dovuta essere una sola marea al giorno. Il ragionamento era che la Luna attira l'acqua facendola diventare più alta dalla parte della Luna stessa, e dato che la Terra nel frattempo gira su se stessa, questo fa sì che in una data postazione la marea vada su e giù ogni ventiquattro ore. Ma in realtà la marea va su e giù ogni dodici ore. Un'altra scuola di pensiero sosteneva che l'alta marea è dall'altra parte della Terra, in quanto la Luna attirerebbe la terra solida verso di sé, spostandola rispetto all'acqua! Entrambe queste teorie sono sbagliate. In realtà funziona così: le forze di attrazione della Luna sulla terra e sull'acqua si equilibrano nel centro. Ma l'acqua che si trova più vicino alla Luna viene attratta *più* della media, mentre quella più lontana viene attratta *meno*. Inoltre, l'acqua può scorrere, la rigida terra no. Il giusto quadro della situazione è dato dalla combinazione di queste cose. Ma cosa significa «si equilibrano»? Che cosa fa equilibrio con che cos'altro? Se la Luna attira la Terra verso di sé, perché la Terra non cade direttamente sulla Luna? Non cade perché fa la stessa cosa, gira attorno a un punto che è al suo interno, ma non è il centro. Non è che la Luna

esattamente giri attorno alla Terra, ma la Terra e la Luna entrambe girano attorno a un punto centrale, ognuna «cade» verso la sua posizione, come si vede nella figura 24. Questo moto attorno al centro comune è ciò che equilibra la caduta. Quindi la Terra non si muove in linea retta, ma in cerchio.

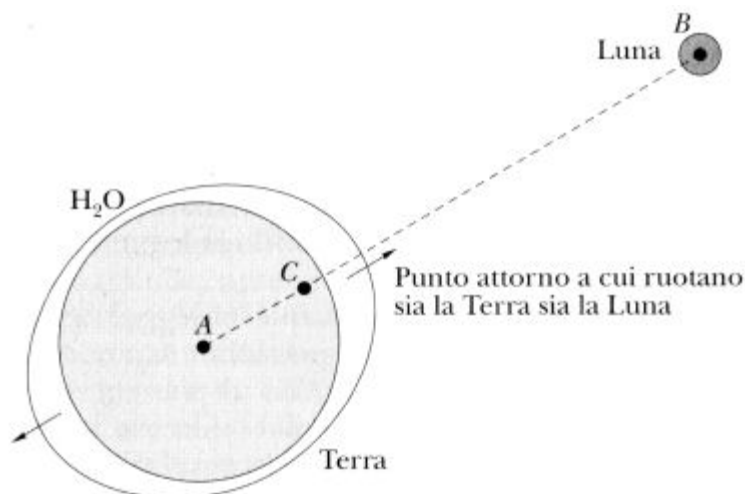


Fig. 24 - Il sistema Terra-Luna, con le maree.

Dalla parte più lontana dalla Luna l'acqua è «sbilanciata» perché lì l'attrazione della Luna è più debole che al centro della Terra, dove bilancia esattamente la forza centrifuga. Il risultato di questo sbilanciamento è che l'acqua sale, allontanandosi dal centro della Terra. Dalla parte della Luna l'attrazione è più forte, e l'acqua si muove nella direzione opposta, ancora allontanandosi dal centro della Terra. Il risultato netto sono due alte maree.

Gravitazione universale

Cos'altro possiamo prevedere utilizzando la gravità? Tutti sanno che la Terra è rotonda. Perché? Facile: dipende dalla gravitazione. Si può capire che la Terra è rotonda semplicemente pensando al fatto che ogni cosa attira ogni altra, e quindi la Terra «attira se stessa» il più

possibile. Per essere precisi, la Terra non è esattamente una sfera perché è in rotazione, e questo crea effetti centrifughi all'equatore. La sua forma risulta essere ellittica, e l'equazione dell'ellisse si può calcolare con precisione. Quindi possiamo dedurre che il Sole, la Terra e la Luna devono essere (quasi) delle sfere semplicemente usando la legge di gravitazione.

Cos'altro possiamo fare con questa legge? Se osserviamo i satelliti di Giove possiamo capire ogni dettaglio del loro moto attorno al pianeta. Incidentalmente, vi furono difficoltà nello studio delle lune di Giove che forse vale la pena riportare. Olaus Roemer, che ne fece uno studio accuratissimo, notò che a volte sembravano in anticipo, a volte in ritardo rispetto alle previsioni di Newton. (Il loro orario si può scoprire restando lungamente in attesa e ricavando quanto tempo occorre in media a ogni satellite per fare il giro). Precisamente, risultò che le lune erano *in anticipo* quando Giove era vicino alla Terra e *in ritardo* quando era lontano. Una cosa difficilmente spiegabile in base alla legge di gravitazione; poteva significare la morte di questa straordinaria teoria, se non si fosse trovata nessun'altra spiegazione. Se anche in un solo caso una legge non funziona come dovrebbe, è semplicemente sbagliata. Ma la ragione di questa discrepanza era molto semplice ed elegante: ci vuole un po' per riuscire a vedere le lune di Giove, a causa del tempo che la luce impiega per giungere fino alla Terra. Quando Giove è più vicino a noi questo tempo è leggermente minore, e viceversa. Ecco perché le lune sembrano un po' in anticipo o un po' in ritardo, a seconda della loro distanza dalla Terra; questo fenomeno dimostrò che la luce non si propaga istantaneamente, e fornì la prima stima della velocità della luce. Tutto ciò accadeva nel 1656. Se tutti i pianeti si attirano a vicenda, allora la forza che governa, per esempio, il moto di Giove attorno al Sole non è solo l'attrazione del Sole, c'è anche l'attrazione diciamo di Saturno. Non sarà molto grande, perché il Sole ha una massa di gran lunga maggiore di Saturno, ma per poca che sia esiste, e quindi l'orbita di Giove non sarà un'ellisse perfetta; e in effetti non lo è: è leggermente sfalsata, «oscilla» attorno all'orbita ellittica «giusta». Un tale moto è leggermente più complicato. Si è tentato di analizzare il moto di Giove, di Saturno e di Urano basandosi sulla legge di gravitazione: si è calcolato l'effetto di ogni pianeta sugli altri per vedere se le piccole deviazioni e irregolarità del loro moto si potessero dedurre esattamente in base a quest'unica legge. Udite udite! Per Giove e Saturno andò tutto bene,

ma Urano sfuggiva a ogni comprensione, comportandosi in maniera bizzarra. Non descriveva un'ellisse perfetta, e questo è comprensibile, data l'attrazione di Giove e Saturno. Ma anche tenendo in conto queste attrazioni, l'orbita di Urano non era quella giusta, quindi la legge di gravitazione era a rischio di venire abbandonata, possibilità che non si può scartare a priori. In Gran Bretagna e in Francia, due astronomi, Adams e Leverrier, elaborarono, indipendentemente, un'altra spiegazione: era possibile che Urano subisse l'attrazione di un altro pianeta, scuro e invisibile, che gli uomini non avevano mai visto. Entrambi calcolarono dove doveva trovarsi per rendere conto delle irregolarità dell'orbita di Urano e scrissero lettere ai rispettivi Osservatori, dicendo: «Signori, puntate i telescopi nel punto di coordinate così e così e vedrete un altro pianeta». Spesso tutto dipende dalle persone con cui si lavora, se vi stanno a sentire oppure no. A Leverrier prestarono attenzione, guardarono, ed ecco lì Nettuno! Anche gli altri, a questo punto, si affrettarono a guardare, qualche giorno più tardi, e lo trovarono.

Questa scoperta dimostra che le leggi di Newton sono assolutamente esatte nel sistema solare, ma si estendono anche al di là delle distanze relativamente piccole tra i pianeti? La prima verifica è nella domanda: le stelle si attraggono l'una con l'altra come fanno i pianeti? Ne abbiamo prova certa nelle cosiddette *stelle doppie*.

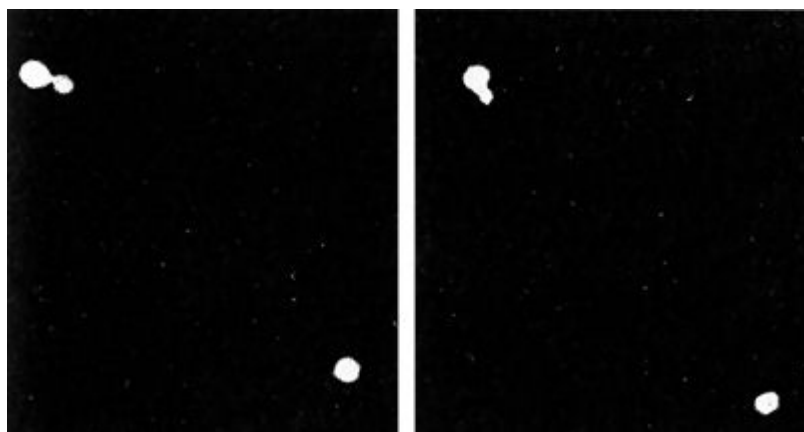


Fig. 25 - Una stella doppia.

La figura 25 mostra uno di tali sistemi formato da due stelle molto vicine (per fortuna ce n'è una terza, così sappiamo che la fotografia

non è stata stampata al contrario). Nell'immagine a destra le vediamo ad alcuni anni di distanza. Si vede che, rispetto alla stella «fissa», l'asse della coppia è ruotato, cioè le due stelle stanno girando l'una attorno all'altra. Il loro moto è in accordo con le leggi di Newton? Nella figura 26 sono riportati i risultati di accurate misure effettuate su uno di questi sistemi; possiamo vedere una bella ellisse, risultante da osservazioni effettuate a partire dal 1862 fino al 1904 (a quest'ora avrà fatto un altro giro). Tutto collima con le leggi di Newton, eccetto per il fatto che Sirio A non è nel fuoco dell'ellisse. Perché? Perché il piano dell'ellisse non è il «piano del cielo». Il nostro punto di osservazione non è nell'angolazione giusta rispetto al piano dell'orbita, e quando si guarda un'ellisse di sbieco rimane sempre un'ellisse, ma il fuoco non appare nella giusta posizione. Quindi le stelle doppie si muovono l'una rispetto all'altra in accordo con la legge di gravitazione.

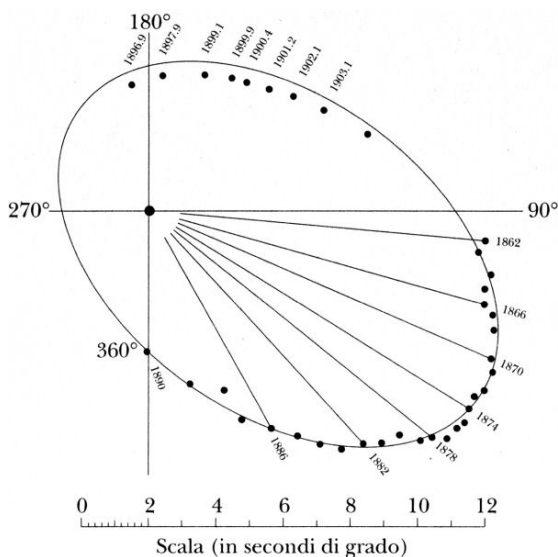


Fig. 26 - Orbita di Sirio B relativa a Sirio A.

Che la legge di gravitazione sia vera anche a distanze maggiori è evidente dalla figura 27. Chi non riesce a vedere qui la gravità in azione, non ha un'anima! Questa figura mostra una delle immagini più belle che il cielo ha da offrire: un ammasso globulare. Ogni puntino è una stella. Al centro sembrano formare una massa compatta, ma questo è dovuto all'insufficiente risoluzione dei nostri

strumenti. In realtà, anche qui la distanza tra una stella e l'altra è molto grande, e raramente avvengono collisioni. Ci sono più stelle all'interno che verso l'esterno, e spostandosi verso la periferia ce ne sono sempre meno.



Fig. 27 - Un ammasso globulare.

È ovvio che vi è attrazione tra queste stelle. È chiaro che la gravitazione esiste anche a queste enormi distanze, magari centomila volte le dimensioni del sistema solare. Ma spingiamoci ancora più in là, e osserviamo un'intera galassia, nella figura 28. La sua forma suggerisce un'ovvia tendenza della materia ad agglomerarsi. Naturalmente non possiamo dimostrare che qui vale la legge dell'inverso del quadrato, ma è evidente che anche a questa scala enorme esiste un'attrazione che tiene insieme le cose. Si potrebbe obiettare: «Complimenti, ma perché non è una palla?». Perché sta *ruotando*, e perciò possiede un momento angolare che non si può esaurire nella contrazione, quindi si contrae quasi esclusivamente in un piano. (Tra parentesi, se volete un buon problema di ricerca, ancora non si sanno i particolari su come si formano i bracci e cosa determina l'esatta forma della galassia).

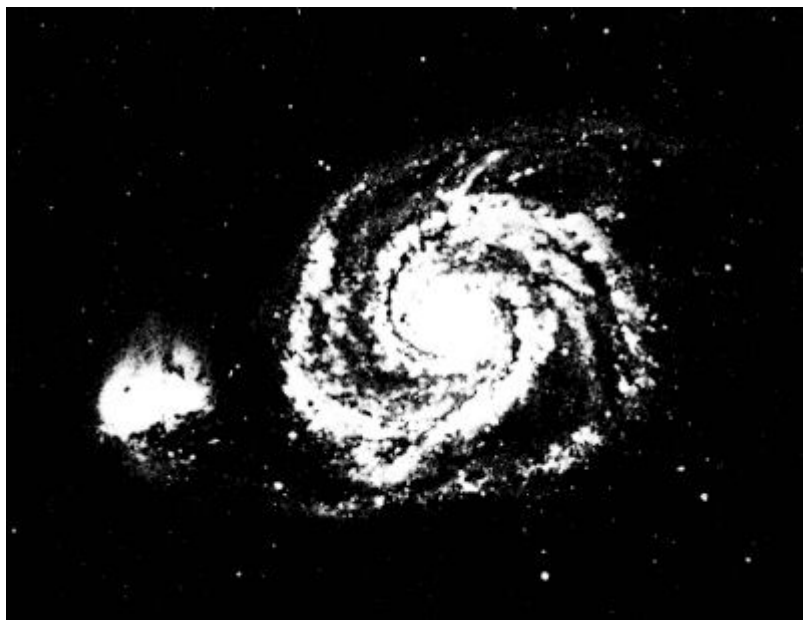


Fig. 28 - Una galassia.

Comunque, è chiaro che la forma della galassia è dovuta alla gravitazione, anche se, data la complessità della sua struttura, non è ancora stato possibile analizzarla in dettaglio. Le dimensioni di una galassia possono andare dai cinquantamila ai centomila anni luce, mentre la distanza tra la Terra e il Sole è di soli 8,5 minuti luce, il che vi dà un'idea della scala. Sembra che la gravità si estenda anche più lontano, come mostra la figura 29, in cui si vedono molte «piccole» cose ammassate insieme. Si tratta di un ammasso di galassie, analogo a un ammasso stellare. Quindi le galassie si attraggono l'un l'altra a distanze tali da formare anch'esse degli ammassi.



Fig. 29 - Ammasso di galassie.

Forse la gravitazione agisce anche a distanze di decine di milioni di anni luce; per quanto ne sappiamo il campo della gravità arriva all'infinito, diminuendo d'intensità come l'inverso del quadrato della distanza. Non solo possiamo quindi capire le nebulose, ma dalla legge di gravitazione possiamo anche intuire qualcosa sull'origine delle stelle. Se abbiamo una grande nube di polvere e di gas, come quella della figura 30, l'attrazione gravitazionale delle particelle di polvere potrebbe causare dei piccoli grumi.



Fig. 30 - Nube di polvere interstellare.

Appena visibili nella figura sono «piccole» macchie nere che potrebbero essere l'inizio dell'accumulazione di polvere e gas che, a causa dell'attrazione gravitazionale, formano le stelle. Non è chiaro se sia mai stata osservata la formazione di una stella.

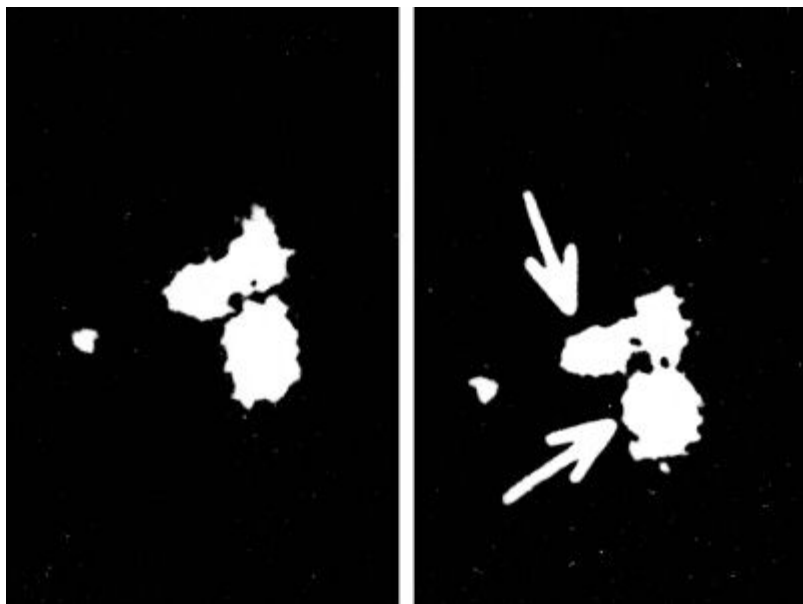


Fig. 31 - Possibile formazione di nuove stelle.

La figura 31 mostra l'unico indizio in nostro possesso: a sinistra una fotografia di una regione di gas, con al cune stelle, fatta nel 1947; a destra, la fotografia della stessa regione, fatta sette anni più tardi, in cui si vedono due nuovi punti luminosi. Forse il gas si è accumulato, la gravità lo ha ammassato in una palla abbastanza grande da far partire le reazioni nucleari stellari all'interno, e forse è diventato una stella. Ma forse no. Non è ragionevole aspettarsi in soli sette anni la fortuna di veder nascere una stella, figuriamoci due!

L'esperimento di Cavendish

La gravitazione, dunque, si estende su enormi distanze. Ma se esiste una forza che agisce su tutti gli oggetti, dovremmo riuscire a misurarla anche sugli oggetti del nostro mondo. Invece di guardare le stelle che girano l'una attorno all'altra, perché non prendiamo una biglia di marmo e una di piombo e misuriamo l'attrazione tra loro? La difficoltà di un simile esperimento, operando in maniera così semplicistica, è l'estrema debolezza della forza. Va eseguito con

grande cura, il che significa isolare l'apparato dall'aria, assicurarsi che non vi siano cariche elettriche e così via; solo allora si può misurare la forza. Il primo a farlo fu Cavendish con l'apparato illustrato schematicamente nella figura 32.

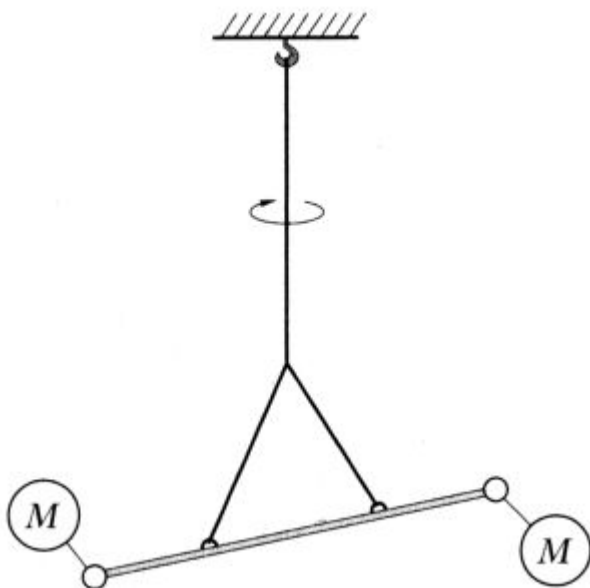


Fig. 32 - Diagramma semplificato dell'apparato sperimentale usato da Cavendish per verificare la legge di gravitazione universale su piccoli oggetti, e misurare la costante gravitazionale G .

Questo esperimento calcolò la forza di attrazione fra due grandi palle di piombo fisse e due palle più piccole alle estremità di una piccola sbarra sostenuta da una fibra sottilissima, detta *fibra di torsione*. Misurando la torsione della fibra si può misurare la forza, verificare che è inversamente proporzionale al quadrato della distanza e determinarne l'intensità. Quindi si può determinare accuratamente il coefficiente G nella formula:

$$F = G \frac{mm'}{r^2}$$

Tutte le masse e le distanze sono note. Mi direte: «Lo sapevamo già per la Terra». Sì, ma non conosciamo la *massa* della Terra. Sapendo quanto vale G e quanto è intensa l'attrazione della Terra possiamo dedurre la sua massa! Cavendish asseriva di «pesare la Terra», ma in realtà stava misurando il coefficiente G , l'unico modo, questo, per determinare la massa della Terra. L'esperimento determina il seguente valore per G :

$$6,670 \times 10^{-11} \text{ newton} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2.$$

Il grande successo della teoria della gravitazione ha prodotto un effetto sulla storia della scienza che non sarà mai apprezzato a sufficienza. Confrontiamo la confusione, la mancanza di sicurezza, le conoscenze incomplete che caratterizzarono i secoli passati, le infinite discussioni e i paradossi di quegli anni con la chiarezza e semplicità di questa legge. Questo fatto, che le lune e i pianeti e le stelle sono governati da una regola semplice, e l'uomo è stato in grado di capirla e prevedere il moto dei pianeti, è alla base del successo delle scienze negli anni a seguire, perché ha reso plausibile la speranza che anche altri fenomeni del mondo siano governati da leggi tanto semplici e meravigliose.

Che cos'è la gravità ?

Ma è veramente così semplice, questa legge? Qual è il meccanismo? In fondo abbiamo solo descritto *come* la Terra si muove attorno al Sole, ma non abbiamo capito *che cosa* la fa muovere. Newton non fece alcuna ipotesi su questo: era soddisfatto di aver scoperto cosa succede, senza spiegare perché; nessuno, da allora, ha mai scoperto il meccanismo. Questo carattere astratto è peculiare delle leggi fisiche. La legge di conservazione dell'energia è un teorema riguardante quantità da calcolare e sommare, senza alcun accenno al meccanismo interno, e analogamente le grandi leggi della meccanica sono leggi matematiche quantitative per cui non abbiamo nessuna spiegazione. Perché per descrivere la natura possiamo usare la

matematica, senza riuscire a spiegare il funzionamento? Nessuno lo sa, ma dobbiamo andare avanti lo stesso in questo modo, perché funziona.

Sono state avanzate molte ipotesi sul meccanismo interno della gravitazione; è interessante descriverne una, proposta a varie riprese nella storia. Quando qualcuno la «scopre» di solito si esalta, ma per poco, perché poi capisce che è sbagliata. La prima volta è successo circa nel 1750. Ipotizziamo l'esistenza di molte particelle che si muovono a grande velocità in tutte le direzioni nello spazio, e che vengono assorbite solo in piccola parte quando attraversano la materia. Quando vengono assorbite, per esempio dalla Terra, le comunicano un impulso. Tuttavia, dato che vanno in ogni direzione, gli impulsi si bilanciano l'uno con l'altro. Ma quando il Sole è nelle vicinanze, le particelle che arrivano verso la Terra dalla parte del Sole saranno parzialmente assorbite dal Sole stesso, quindi ne arrivano di meno che dalla parte opposta. Perciò la Terra percepisce un impulso netto in direzione del Sole, e non ci vuole molto a convincersi che varia come l'inverso del quadrato della distanza, a causa della variazione dell'angolo solido sotteso dal Sole al variare della distanza. Cosa c'è che non va in questa spiegazione? Semplicemente, alcune conseguenze non sono vere. C'è il seguente problema: la Terra, girando attorno al Sole, dovrebbe scontrarsi con più particelle nella direzione del suo moto - cioè «davanti» - che «dietro» (quando si corre e sta piovendo, la pioggia è più forte sulla faccia che sulla nuca); quindi ci dovrebbe essere più impulso da davanti, e la Terra dovrebbe avvertire una resistenza e rallenterebbe il suo moto sull'orbita. Si può calcolare quanto ci metterebbe a fermarsi, ed è facile rendersi conto che a quest'ora dovrebbe essersi fermata da un pezzo. Quindi questa spiegazione non funziona. Finora non è stata data alcuna «spiegazione» della gravità che non implicasse qualche conseguenza inesistente.

Ora discuteremo la possibile relazione della gravità con le altre forze. Ora come ora essa non è riconducibile ad altre forze. Non è un aspetto dell'elettricità, o niente del genere, quindi non abbiamo nessuna spiegazione di questo tipo. Però la gravità è molto simile alle altre forze, ed è interessante osservare le analogie. Per esempio, la forza elettrica tra due oggetti carichi ha un'espressione del tutto simile a quella della legge di gravitazione: è una costante (con segno meno) per il prodotto delle cariche, e varia inversamente al quadrato della distanza. È nella direzione opposta (le cariche uguali si respingono),

zionale tra due elettroni.

Tra le altre possibilità considerate c'è un'eventuale relazione con l'età dell'universo (chiaramente bisogna cercare qualche altro numero molto grande, da qualche parte). Ma l'età dell'universo in che unità di misura, in anni? Ovviamente no, perché l'anno non è un'unità di misura naturale, è stato inventato dall'uomo. Per trovare qualcosa di naturale prendiamo per esempio il tempo che la luce impiega per attraversare un protone, 10^{-24} secondi. In questa unità l'età dell'universo (che è stimata in circa 2×10^{10} anni) vale circa 10^{42} . Ha più o meno lo stesso numero di zeri, quindi è stato ipotizzato un legame tra la costante gravitazionale e l'età dell'universo. Se fosse così la «costante» gravitazionale sarebbe dipendente dal tempo, perché a mano a mano che l'universo invecchia aumenta il rapporto tra la sua età e il tempo che la luce impiega ad attraversare un protone. È possibile che la costante gravitazionale sia dipendente dal tempo? Naturalmente le variazioni sarebbero così piccole da rendere molto difficile un controllo. Come verifica, potremmo pensare di calcolare quale sarebbe la variazione della costante gravitazionale negli ultimi 10^9 anni, che è approssimativamente il tempo trascorso dalla comparsa delle prime forme di vita sulla Terra, ed è anche un decimo dell'età dell'universo. Durante questo tempo la costante gravitazionale dovrebbe essere aumentata all'incirca del 10 per cento. Dalla struttura interna del Sole (l'equilibrio tra il peso della sua materia e la velocità con cui l'energia radiante viene generata al suo interno) risulta che se la forza di gravità aumentasse del 10 per cento il Sole sarebbe, in proporzione, molto più brillante: la sua luminosità aumenterebbe con la *sesta* potenza della costante di gravità! Calcolando cosa succederebbe all'orbita della Terra con una gravità più intensa, vediamo che la Terra si troverebbe più vicina al Sole; la sua superficie sarebbe più calda di circa 100 gradi e tutta l'acqua del mare evaporerebbe nell'atmosfera; perciò la vita non avrebbe potuto avere origine nel mare. Quindi non crediamo che la costante di gravità vari con l'età dell'universo. Ma questo tipo di ragionamento non è molto convincente, e il problema non è chiuso del tutto. È invece assodato che la forza di gravità è proporzionale alla *massa*, la quantità che fondamentalmente misura l'inerzia (cioè quanto sia faticoso mantenere qualcosa su una traiettoria circolare). Due oggetti, uno leggero e uno pesante, entrambi su un'orbita circolare e alla stessa velocità attorno a un oggetto molto più grande, a causa della

gravità, rimarranno insieme, perché per girare in cerchio ci vuole una forza più grande se la massa è maggiore. Cioè: la gravità è maggiore o minore, a seconda della massa, esattamente quanto occorre perché i due oggetti girino assieme. Se uno dei due oggetti fosse dentro l'altro, rimarrebbe al suo interno: è un equilibrio perfetto. Quindi Gagarin e Titov avevano all'interno della loro navicella cose «senza peso»: se per esempio avessero lasciato andare un pezzetto di gesso, lo avrebbero visto galleggiare nello spazio, perché il gesso avrebbe ruotato attorno alla Terra esattamente nello stesso modo dell'intera navicella spaziale. È molto interessante che questa forza sia *esattamente* proporzionale alla massa con tanta precisione, perché se non fosse così ci sarebbero effetti per cui l'inerzia e il peso sarebbero diversi. L'assenza di tali effetti è stata verificata con grande accuratezza mediante un esperimento eseguito prima da Eötvös nel 1909, e più recentemente da Dicke. Per tutte le sostanze esaminate la massa e il peso sono esattamente proporzionali con un errore minore di uno su un miliardo. È un esperimento veramente notevole.

Gravità e relatività

Un altro tema meritevole di discussione è la modifica di Einstein alla legge di gravitazione di Newton. Nonostante tutto l'entusiasmo suscitato, la legge di Newton è sbagliata! Fu modificata da Einstein per rendere conto della teoria della relatività. Secondo Newton, l'effetto della gravità è istantaneo; cioè, se muoviamo una massa, sentiamo istantaneamente una nuova forza a causa della nuova posizione di quella massa. In questo modo mandiamo segnali a velocità infinita. Nella teoria proposta da Einstein è *impossibile mandare segnali a velocità maggiore della luce*, quindi la legge di gravitazione deve essere errata. Si può correggere, tenendo conto del ritardo nella trasmissione dei segnali, e si ottiene una nuova legge: la legge di gravitazione di Einstein. Una caratteristica facile da capire di questa nuova legge è la seguente: nella teoria della relatività di Einstein ogni cosa dotata di *energia* è anche dotata di massa (sente, cioè, l'attrazione gravitazionale). Perfino la luce quindi, dato che ha energia, ha una massa. Quando un raggio di luce passa vicino al Sole

sente la sua attrazione gravitazionale; la luce, quindi, non viaggia in linea retta, ma viene deviata. Durante un'eclissi di Sole, per esempio, le stelle che si vedono attorno al Sole dovrebbero risultare spostate rispetto alla posizione che avrebbero se il Sole non fosse proprio lì, e in effetti la cosa è stata osservata sperimentalmente. Infine, paragoniamo la gravitazione con altre teorie. In anni recenti abbiamo scoperto che la massa è costituita di minuscole particelle, e che ci sono vari tipi di interazione, le forze nucleari, ecc. Finora non si è riusciti a spiegare la forza di gravità tramite queste forze elettriche o nucleari. Gli aspetti quantistici della natura ancora non sono stati estesi alla gravitazione; quando la scala è tanto piccola da rendere rilevanti gli effetti quantistici, gli effetti gravitazionali sono così deboli che non si sente il bisogno di una teoria quantistica della gravitazione. D'altra parte, per la coerenza interna delle nostre teorie fisiche sarebbe importante vedere se la legge di Newton modificata da Einstein si possa modificare ulteriormente in modo da comprendere il principio di indeterminazione. Quest'ultima modifica non è stata ancora completata.

VI

COMPORTAMENTO QUANTISTICO

Meccanica atomica

Negli ultimi capitoli abbiamo descritto le idee fondamentali necessarie a capire quasi tutti i fenomeni più importanti riguardo alla luce, o, più in generale, alle onde elettromagnetiche. Abbiamo cioè trattato la «teoria classica» delle onde elettriche, che risulta essere una descrizione perfettamente adeguata della natura per un gran numero di effetti. Non ci siamo ancora interessati del fatto che l'energia luminosa si presenta a pacchetti, chiamati *fotoni*.

Vorremmo ora trattare il problema del comportamento di pezzi di materia relativamente grandi, per esempio considerare le loro proprietà meccaniche e termiche. Affrontando questo argomento troveremo che la teoria classica (quella più vecchia) fallisce quasi immediatamente, perché la materia è in realtà costituita di particelle di dimensioni atomiche. Tuttavia, tratteremo soltanto la parte classica, perché è la sola comprensibile mediante la meccanica classica che abbiamo imparato finora. Ma non andremo molto avanti. Scopriremo che nel caso della materia, al contrario della luce, ci si trova in difficoltà relativamente presto. Potremmo, certo, ignorare sistematicamente gli effetti atomici, ma abbiamo scelto invece di dare qui una breve descrizione delle idee fondamentali sulle proprietà quantistiche della materia, cioè le idee quantistiche della fisica atomica, così da darvi un'idea di cosa stiamo tralasciando. Infatti dovremo tralasciare alcuni importanti argomenti, a cui tuttavia non potremo evitare di avvicinarci.

Quindi esporremo ora un'introduzione alla meccanica quantistica, ma solo più avanti riusciremo veramente a entrare in argomento. La *meccanica quantistica* è la descrizione del comportamento della materia, in particolare di ciò che succede su scala atomica. Su scala molto piccola le cose si comportano in un modo che non vi immaginate nemmeno. Non si comportano come onde, né come particelle, né come nuvole, né palle da biliardo, né pesi, né molle, né come nient'altro abbiate mai visto. Newton pensava che la luce fosse costituita di particelle, ma poi si scoprì, come abbiamo visto, che si comporta come un'onda. Più tardi però (all'inizio del Novecento) si è osservato che effettivamente la luce si comporta, a volte, come una

particella. Da sempre si credeva che l'elettrone fosse una particella, e poi si è scoperto che sotto molti punti di vista si comporta come un'onda. E che quindi, in realtà, non si comporta né come particella né come onda. Ora ci siamo arresi, e diciamo semplicemente: «Non è né una cosa né l'altra».

Però c'è una cosa positiva: gli elettroni si comportano come la luce. Il comportamento quantistico degli oggetti atomici (elettroni, protoni, neutroni, fotoni e così via) è lo stesso per tutti, sono tutti «onde corpuscolari», o come li volete chiamare. Quindi ciò che impariamo sul comportamento degli elettroni (che useremo nei nostri esempi) si applica anche a tutte le altre «particelle», inclusi i quanti di luce o fotoni. Le informazioni sul comportamento atomico e su piccola scala che si erano andate via via accumulando durante il primo quarto del Novecento, nel dare indicazioni su come realmente si comportano le cose piccole, generarono una confusione crescente, finalmente risolta tra il 1926 e il 1927 da Schrödinger, Heisenberg e Born. La loro descrizione del comportamento della materia su piccola scala fu alla fine coerente, e in questo capitolo ne delinearemo le caratteristiche principali. Il comportamento atomico, essendo lontanissimo dalle esperienze ordinarie, appare peculiare e misterioso a chiunque, a chi appena inizia a studiare la fisica come a chi ha anni di esperienza, e farci l'abitudine non è per niente facile. Perfino gli esperti non lo capiscono come vorrebbero, e questo è perfettamente logico, perché l'esperienza diretta e l'intuizione umana si applicano solo agli oggetti macroscopici. Sappiamo come agiscono gli oggetti grandi, ma le cose su piccola scala funzionano, semplicemente, in modo diverso. Quindi dobbiamo imparare a conoscerle in modo astratto, o fantasioso, e non in relazione alla nostra esperienza diretta. In questo capitolo affronteremo immediatamente l'elemento fondamentale del comportamento misterioso nella sua forma più strana. Esamineremo un fenomeno che è impossibile, *assolutamente* impossibile spiegare in modo classico, e che sta al cuore della meccanica quantistica. In realtà, è l'*unico* mistero. Non riusciremo a chiarire il mistero, a spiegare cioè come funziona; possiamo solo descrivere come funziona. In questa descrizione stanno le peculiarità fondamentali di tutta la meccanica quantistica.

Un esperimento con i proiettili

Per cercare di capire il comportamento quantistico degli elettroni, li confronteremo, in un particolare apparato sperimentale, con particelle più familiari come i proiettili, e poi con le onde dell'acqua. Consideriamo prima di tutto l'apparato sperimentale mostrato schematicamente nella figura 34. Supponiamo di avere una mitragliatrice che spara raffiche di proiettili; non è molto precisa, perché sparge le pallottole (a caso) in un angolo abbastanza grande, come si vede in figura. Davanti alla mitragliatrice c'è una barriera (una lastra corazzata) con due fori, grandi più o meno quanto basta a far passare una pallottola. Oltre la barriera c'è uno schermo d'arresto per i proiettili (per esempio una spessa parete di legno), e di fronte allo schermo un «rivelatore» di pallottole: potrebbe essere una scatola con della sabbia dove i proiettili si arrestano, e possono essere contati. Il rivelatore si può muovere su e giù, in quella che chiameremo la direzione x . Con questo apparato possiamo trovare sperimentalmente la risposta alla domanda: «Qual è la probabilità che una pallottola passando attraverso i fori arrivi sullo schermo a distanza x dal centro?». Prima di tutto, bisogna capire che si tratta di probabilità, perché non possiamo sapere esattamente dove finirà ogni singola pallottola. Una pallottola che rimbalzi sul bordo di un foro può finire in qualsiasi punto.

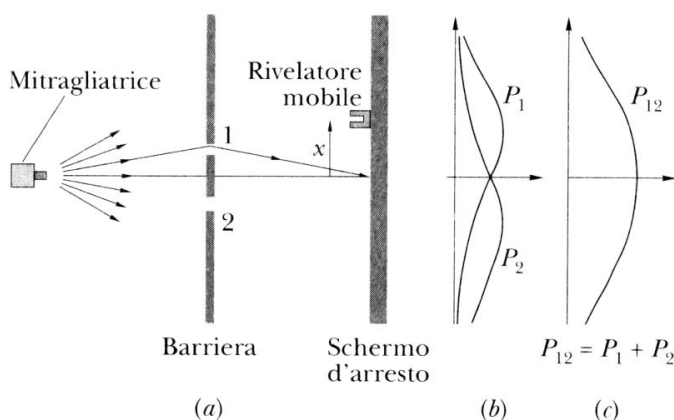


Fig. 34 - esperimento di interferenza con pallottole.

Con la parola «probabilità» intendiamo l'eventualità che la pallottola arrivi al rivelatore, e la possiamo misurare contando le pallottole arrivate in un certo intervallo di tempo e facendo il rapporto con il totale di pallottole sparate in quell'intervallo. Oppure, nell'ipotesi che la mitragliatrice spari a ritmo costante durante tutto l'esperimento, la probabilità è proporzionale al numero di pallottole che raggiungono il rivelatore in un intervallo di tempo prestabilito.

Per i nostri scopi attuali immagineremo una situazione in qualche modo idealizzata, in cui le pallottole, a differenza dei proiettili veri, sono *indistruttibili*: non si possono spezzare. Nel nostro esperimento si vedrà che le pallottole arrivano a «pacchetti», e quando troviamo qualcosa nel rivelatore si tratterà sempre di una pallottola intera. Se la mitragliatrice spara molto lentamente, troveremo che sullo schermo d'arresto, in ogni dato momento, o non arriva niente, o arriva una sola pallottola, esattamente una. È certo inoltre che la dimensione del pacchetto non dipende dalla rapidità di fuoco della mitragliatrice. Diremo: «Le pallottole arrivano *sempre* in pacchetti identici». Quella che misuriamo con il rivelatore è la probabilità che arrivi un pacchetto, e la misuriamo come funzione di x . Il risultato di queste misurazioni (non abbiamo ancora fatto l'esperimento, si tratta quindi di un risultato ipotetico) è riportato nella parte (c) della figura. Chiamiamo P_{12} la probabilità perché le pallottole possono essere passate sia per il foro 1 che per il foro 2. Non è poi troppo sorprendente che sia più grande verso il centro del grafico e diventi più piccola al crescere di x ; però forse vale la pena di spiegare perché il massimo sia proprio per $x = 0$. Questo si può capire ripetendo l'esperimento dopo aver coperto il foro 2, e ancora dopo aver coperto il foro 1. Quando il foro 2 è chiuso, le pallottole passano solo attraverso il foro 1, e si ottiene la curva indicata con P_1 nella parte (b) della figura. Com'è ragionevole aspettarsi, il massimo di P_1 si verifica nel valore di x che si trova in linea retta con la mitragliatrice e il foro 1; analogamente quando copriamo il foro 1 otteniamo la curva P_2 , simmetrica di P_1 . Confrontando le parti (b) e (c) della figura troviamo il seguente importante risultato:

$$[1] \qquad P_{12} = P_1 + P_2 .$$

Semplicemente, le probabilità si sommano. L'effetto con entrambi i fori aperti è la somma degli effetti con un solo foro aperto alla volta.

Chiameremo questo risultato un'osservazione di «non interferenza», e la ragione sarà chiara tra breve. Questo è quanto, per le pallottole. Arrivano a pacchetti, e la probabilità di arrivo non mostra interferenza.

Un esperimento con le onde

Ora vogliamo considerare un esperimento che riguarda le onde d'acqua; vediamo l'apparato schematizzato nella figura 35.

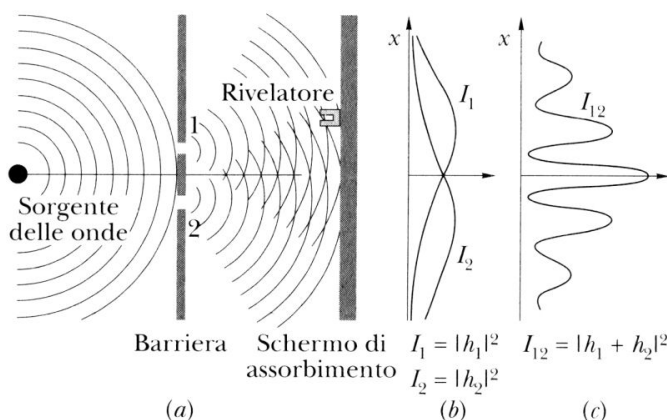


Fig. 35 - esperimento di interferenza con onde d'acqua.

Abbiamo una vaschetta d'acqua poco profonda. Sulla sinistra c'è la sorgente delle onde, che può essere una pallina, mossa da un motore, che oscilla su e giù creando onde circolari. A destra della sorgente abbiamo ancora una barriera con due aperture, e al di là della barriera uno schermo che assorbe le onde senza rifletterle: per esempio, una «spiaggia» digradante di sabbia. Di fronte alla spiaggia mettiamo un rivelatore che si può muovere avanti e indietro nella direzione x , come prima. Il rivelatore ora è uno strumento che misura l'intensità del moto ondoso; possiamo immaginare un aggeggio che misura l'altezza dell'onda, ma in scala graduata proporzionalmente al *quadrato* dell'altezza, così che la lettura sia proporzionale all'intensità dell'onda. Il rivelatore quindi legge

l'energia portata dall'onda, o meglio, la quantità di energia che arriva ad esso nell'unità di tempo. Con questo apparato, la prima cosa da notare è che l'intensità può avere *qualsiasi* valore. Se la sorgente si muove di pochissimo, il rivelatore percepirà solo un minimo di moto ondulatorio. Quando la sorgente si muove di più, il moto ondulatorio aumenta. L'intensità dell'onda può avere assolutamente qualsiasi valore. Non potremmo certo dire che l'intensità arrivi a «pacchetti», come le pallottole.

Ora misuriamo l'intensità dell'onda per vari valori di x , facendo muovere la sorgente sempre allo stesso modo. Otteniamo l'interessante curva indicata con I_{12} nella figura (c). Abbiamo già visto questo tipo di figure quando abbiamo studiato l'interferenza delle onde elettriche; in questo caso osserviamo che l'onda originale viene diffratta alle fenditure, da ciascuna delle quali si diffonde una nuova onda circolare. Se copriamo una fenditura alla volta e misuriamo la distribuzione di intensità nel rivelatore, troviamo le curve piuttosto semplici della figura (b). I_1 è l'intensità dell'onda proveniente dalla fenditura 1 (che misuriamo chiudendo la fenditura 2), e I_2 è l'intensità dell'onda uscente dalla fenditura 2 (misurata quando la 1 è chiusa). La curva I_{12} che si osserva quando entrambe le fenditure sono aperte non è certamente la somma di I_1 e I_2 . Diciamo che c'è *interferenza* tra le due onde. In certi punti (corrispondenti ai massimi di I_{12}) le onde sono in fase e i picchi si sommano, generando una grande ampiezza e quindi una grande intensità. Diciamo che le due onde interferiscono *costruttivamente*; questa interferenza costruttiva si manifesta nei punti in cui la distanza tra il rivelatore e una fenditura è maggiore della distanza tra il rivelatore e l'altra fenditura di un numero intero di lunghezze d'onda. Nei punti in cui le due onde arrivano al rivelatore con una differenza di fase pari a π (cioè dove sono fuori fase) il moto ondoso risultante sarà la differenza delle due ampiezze. Le onde interferiscono *distruttivamente*, e l'intensità dell'onda sarà bassa. Questo succede dove la distanza tra una fenditura e il rivelatore supera la distanza tra il rivelatore e l'altra fenditura di un numero dispari di mezze lunghezze d'onda. I valori più bassi di I_{12} nella figura 35 corrispondono ai punti in cui le due onde interferiscono distruttivamente.

Ricorderete che la relazione quantitativa tra I_1 , I_2 e I_{12} si può esprimere nel modo seguente: l'altezza istantanea dell'onda nel rivelatore per l'onda proveniente dalla fenditura 1 si può scrivere

come la parte reale di $\hat{h}_1 e^{i\omega t}$, ove l'ampiezza $\hat{h}_1$ è, in generale, un numero complesso. L'intensità è proporzionale al quadrato del valor medio dell'altezza, ovvero, usando i numeri complessi, a $|\hat{h}_1|^2$. Analogamente, per la fenditura 2 l'altezza è $\hat{h}_2 e^{i\omega t}$ e l'intensità è proporzionale a $|\hat{h}_2|^2$. Quando entrambe le fenditure sono aperte, le altezze d'onda si sommano a dare l'altezza $(\hat{h}_1 + \hat{h}_2) e^{i\omega t}$ e l'intensità $|\hat{h}_1 + \hat{h}_2|^2$. Omettendo ai nostri fini la costante di proporzionalità, le relazioni per le onde interferenti sono

$$[2] \quad I_1 = |\hat{h}_1|^2, I_2 = |\hat{h}_2|^2, I_{12} = |\hat{h}_1 + \hat{h}_2|^2.$$

Si può notare che il risultato è notevolmente diverso da quello ottenuto nel caso delle pallottole (cfr. equazione [1]); infatti espandendo $|\hat{h}_1 + \hat{h}_2|^2$ abbiamo

$$[3] \quad |\hat{h}_1 + \hat{h}_2|^2 = |\hat{h}_1|^2 + |\hat{h}_2|^2 + 2 \cdot |\hat{h}_1| \cdot |\hat{h}_2| \cos \delta,$$

dove δ è la differenza di fase tra $\hat{h}_1$ e $\hat{h}_2$. In termini di intensità potremmo scrivere

$$[4] \quad I_{12} = I_1 + I_2 + 2 \sqrt{I_1 I_2} \cos \delta$$

L'ultimo termine della [4] è il *termine di interferenza*. Questo è quanto, per le onde. L'intensità può avere qualsiasi valore e mostra interferenza.

Il comportamento degli elettroni

Ora immaginiamo un esperimento simile fatto con elettroni: ne vediamo lo schema nella figura 36. Costruiamo un cannone elettronico fatto di un filo di tungsteno scaldato da corrente elettrica e circondato da una scatola di metallo bucata.

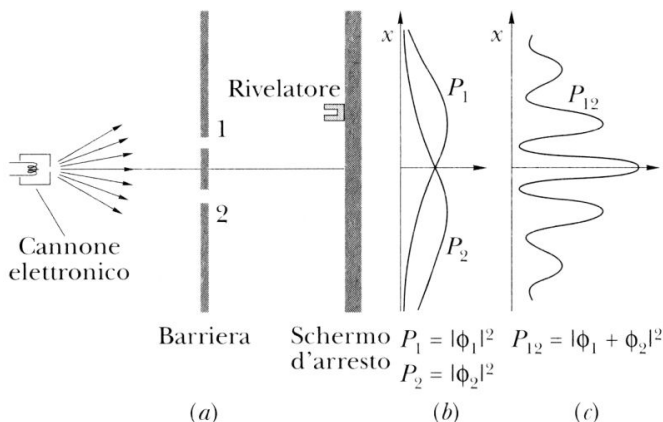


Fig. 36 - esperimento di interferenza con elettroni.

Se il filo è a voltaggio negativo rispetto alla scatola, gli elettroni emessi dal filo verranno accelerati in direzione delle pareti della scatola, e alcuni passeranno attraverso il foro. Tutti gli elettroni provenienti dal cannone avranno circa la stessa energia. Di fronte al cannone c'è una barriera (una lastra di metallo) con due fenditure. Oltre la barriera c'è uno schermo che arresta gli elettroni, con un rivelatore mobile. Il rivelatore può essere un contatore geiger, o, meglio, un moltiplicatore elettronico collegato con un altoparlante.

Diciamo subito che non si può cercare di costruire questo apparato proprio in questo modo (come invece si potrebbe fare con gli altri due esperimenti); il problema è che l'apparato dovrebbe essere piccolissimo per mostrare gli effetti che ci interessano. Stiamo facendo un esperimento ideale, e l'abbiamo scelto perché è semplice da descrivere. Conosciamo i risultati che si troverebbero con questo esperimento, perché ne sono stati fatti altri, con la scala e le proporzioni scelte in modo da mostrare gli effetti che descriveremo.

La prima cosa che notiamo con gli elettroni è che dall'altoparlante provengono dei «click» distinti, e tutti i click sono uguali; non ci sono «mezzi click».

Osserviamo pure che i click arrivano in modo molto irregolare. Tipo click.....click-click...click..... click...click-click.....click..., ecc., proprio come si sente da un contatore geiger. Se contiamo i click che arrivano in un intervallo di tempo sufficiente (diciamo qualche minuto), e poi li contiamo di nuovo in un altro intervallo della stessa ampiezza, vedremo che i due numeri sono pressappoco uguali. Quindi possiamo parlare di velocità media dei click (tanti click in

media al minuto). Spostando il rivelatore avanti e indietro, la velocità dei click cambia, ma la dimensione (intensità di suono) rimane la stessa. Se abbassiamo la temperatura del filo di tungsteno nel cannone la velocità diminuisce, ma ogni click ha ancora lo stesso suono. Osserviamo anche che se mettiamo due rivelatori diversi e separati sullo schermo, o si sente un click in uno o si sente nell'altro, ma mai contemporaneamente. (Tranne quando due click sono molto vicini, e allora magari non si riesce a percepirli distinti). Perciò deduciamo che qualunque cosa sia ciò che arriva ai rivelatori, arriva a pacchetti. Tutti i pacchetti hanno le stesse dimensioni: arrivano solo interi, e uno alla volta. Diremo: «Gli elettroni arrivano sempre in pacchetti identici».

Proprio come nel caso delle pallottole, possiamo ora cercare sperimentalmente la risposta alla domanda: «Qual è la probabilità relativa che un pacchetto di elettroni arrivi allo schermo a distanza x dal centro?». Come prima, otteniamo la probabilità relativa osservando il numero dei click arrivati in un'unità di tempo, mantenendo costante l'attività del cannone. La probabilità che gli elettroni arrivino in un punto x particolare è proporzionale al numero medio di click nell'unità di tempo.

Il risultato del nostro esperimento è l'interessante curva indicata con P nella parte (c) della figura. Ebbene sì! Questo fanno gli elettroni!

Interferenza delle onde di elettroni

Ora cerchiamo di analizzare la curva della figura 36 per vedere se riusciamo a capire il comportamento degli elettroni. La prima cosa che potremmo dire è che, siccome arrivano a pacchetti, ogni pacchetto, che possiamo pure chiamare *elettrone*, è passato o dalla fenditura 1 o dalla 2. Scriviamolo sotto forma di proposizione:

Proposizione A: Ogni elettrone passa o attraverso la fenditura 1 o attraverso la fenditura 2.

Prendendo per buona la proposizione A, gli elettroni che arrivano sullo schermo si possono dividere in due classi: 1) quelli che passano

dalla fenditura 1, e 2) quelli che passano dalla fenditura 2. Quindi la curva che osserviamo dovrebbe essere la somma degli effetti degli elettroni che passano dal foro 1 e di quelli che passano dal foro 2. Controlliamo questa ipotesi con un esperimento. Prima di tutto, effettuiamo una misura per gli elettroni che passano dalla fenditura 1: chiudiamo la 2 e contiamo i click nel rivelatore. In questo modo, otteniamo la curva P_1 , che vediamo nella parte (b) della figura. Il risultato sembra ragionevole. In modo analogo misuriamo la curva P_2 , cioè la distribuzione di probabilità per gli elettroni che passano dalla fenditura 2.

La curva P_{12} che si ottiene quando entrambe le fenditure sono aperte chiaramente non è la somma di P_1 e P_2 . In analogia con l'esperimento riguardante le onde d'acqua diremo: «C'è interferenza».

[5] *Per gli elettroni, $P_{12} \neq P_1 + P_2$.*

Come può verificarsi questa interferenza? Forse dovremmo dire: «Be', questo significa, presumibilmente, che *non è vero* che i pacchetti passano o da una fenditura o dall'altra, perché, se fosse così, le probabilità si dovrebbero sommare. Forse seguono una traiettoria più complicata: si dividono a metà e...». Ma no! Non possono, arrivano sempre a pacchetti... «Be', forse alcuni passano dalla fenditura 1, poi tornano indietro attraverso la 2, poi rifanno il giro qualche altra volta, o magari seguono una traiettoria più complicata... quindi chiudendo la fenditura 2 cambiamo la probabilità che un elettrone partito dalla fenditura 1 arrivi finalmente allo schermo...». Ma osservate! Ci sono alcuni punti in cui arrivano pochissimi elettroni quando entrambe le fenditure sono aperte, ma ne arrivano molti quando una delle due è chiusa, quindi chiudendo una fenditura si aumenta il numero degli elettroni che passano dall'altra. Mentre al centro il grafico P_{12} è più del doppio di $P_1 + P_2$ come se chiudendo una fenditura si diminuisse il numero degli elettroni che passano dall'altra. Sembra difficile spiegare entrambi questi effetti proponendo complicate traiettorie degli elettroni.

E tutto molto misterioso, e più si osserva più misterioso diventa. Si sono elaborate molte idee per cercare di spiegare la curva P_{12} in termini di complicate traiettorie di elettroni individuali che passano dalle fenditure. Nessuna ha funzionato. Nessuna riesce a spiegare la

curva P_{12} in termini di P_1 e P_2 .

Eppure, sorprendentemente, la matematica che serve a mettere in relazione P_{12} con P_1 e P_2 è estremamente semplice. Infatti P_{12} è proprio come la curva I_{12} della figura 35, e quella era semplice. Ciò che si verifica sullo schermo d'arresto si può descrivere usando due

numeri complessi che chiameremo $\hat{\Phi}_1$ e $\hat{\Phi}_2$ (funzioni di x , naturalmente). Il quadrato del modulo di $\hat{\Phi}_1$ dà l'effetto quando è aperta solo la fenditura 1, cioè $P_1 = |\hat{\Phi}_1|^2$. Allo stesso modo l'effetto con la sola fenditura 2 aperta è dato da $\hat{\Phi}_2$ cioè $P_2 = |\hat{\Phi}_2|^2$. L'effetto combinato con le due fenditure aperte è semplicemente $P_{12} = |\hat{\Phi}_1 +$

$\hat{\Phi}_2|^2$. La matematica è la stessa che abbiamo usato per le onde d'acqua! (È difficile immaginare come si possa arrivare a un risultato tanto semplice da un gioco complesso di elettroni che vanno avanti e indietro attraverso le fenditure seguendo qualche strana traiettoria). Perveniamo quindi alla seguente conclusione: gli elettroni arrivano a pacchetti, come particelle, e la probabilità che giungano questi pacchetti è distribuita come la distribuzione di intensità di un'onda. È in questo senso che un elettrone si comporta «un po' come un'onda, un po' come una particella».

Tra l'altro, quando abbiamo parlato delle onde classiche abbiamo definito l'intensità come la media temporale del quadrato dell'ampiezza dell'onda, e abbiamo usato i numeri complessi come espediente matematico per semplificare i calcoli. Ma nella meccanica quantistica risulta che bisogna proprio rappresentare le ampiezze usando i numeri complessi, la sola parte reale non basta. Questo è solo un punto tecnico, per il momento, perché le formule hanno esattamente la stessa struttura.

Dato che la curva P_{12} di probabilità quando entrambe le fenditure sono aperte è tanto semplice (anche se non è uguale a $P_1 + P_2$), non c'è molto altro da dire. Ma ci sono molte conseguenze delicate del fatto che la natura funziona in questo modo, e vorremmo illustrarne qualcuna. Prima di tutto, dato che il numero di elettroni che arriva in un dato punto non è uguale a quelli che passano attraverso l'apertura 1 più quelli che passano attraverso l'apertura 2, come si deduce invece dalla proposizione A, senza dubbio dobbiamo concludere che *la proposizione A è falsa*. Non è vero che gli elettroni

o passano da una fenditura o dall'altra; verificheremo questa conclusione con un altro esperimento.

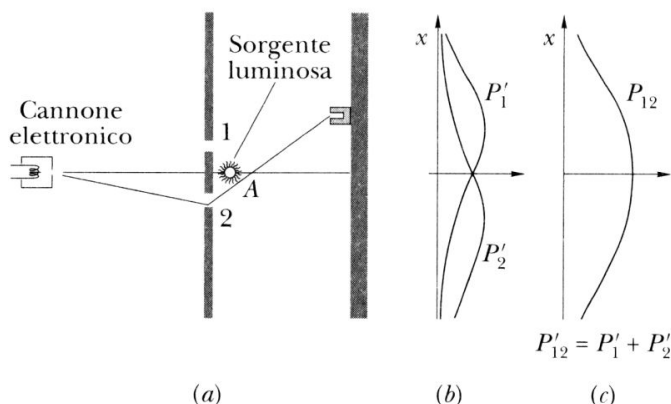


Fig. 37 - Un diverso esperimento con elettroni.

Osservazione degli elettroni

Tentiamo ora il seguente esperimento. Aggiungiamo al nostro apparato una sorgente luminosa molto intensa posta dietro la barriera, tra una fenditura e l'altra, come si vede nella figura 37. Sappiamo che le cariche elettriche diffondono la luce; quindi, quando un elettrone passa da uno dei fori e si avvicina allo schermo d'arresto diffonderà un po' di luce che lo renderà visibile. Se per esempio un elettrone seguisse la traiettoria attraverso la fenditura 2, vedremmo un lampo di luce più o meno nella posizione indicata con «A». Se un elettrone passa attraverso la fenditura 1 ci aspetteremmo di vedere un lampo di luce nei dintorni del foro superiore. Se vedremo due lampi uno da una parte e uno dall'altra nello stesso istante, vuol dire che l'elettrone si è diviso a metà... Ma facciamo l'esperimento! Ecco cosa si vede: ogni volta che si registra un click nel rivelatore (sullo schermo) vediamo anche un lampo di luce o vicino a una fenditura o vicino all'altra, ma mai contemporaneamente; questo risultato si osserva indipendentemente da dove sia il rivelatore. Da questa osservazione dobbiamo concludere che guardando gli elettroni li

vediamo passare o da un foro o dall'altro. Sperimentalmente la proposizione A dev'essere vera.

Ma allora cosa c'è di sbagliato nel nostro ragionamento a confutazione della proposizione A?

Perché P_{12} non è uguale a $P_1 + P_2$? Torniamo all'esperimento! Seguiamo ogni elettrone e cerchiamo di capire cosa fa. Per ogni posizione x del rivelatore contiamo il numero di elettroni che arrivano e prendiamo anche nota da dove passano, guardando i lampi di luce: quando registriamo un click guardiamo dov'è il lampo di luce e mettiamo un segno nella colonna 1 o nella colonna 2 a seconda se l'abbiamo visto passare dalla fenditura 1 o dalla 2. Quindi ogni elettrone appartiene a una di due classi: quelli che passano dal foro 1 e quelli che passano dal foro 2. Dal numero di segni nella colonna 1 otteniamo la probabilità P_1' che un elettrone arrivi al rivelatore attraverso la fenditura 1, e dal numero di segni nella colonna 2 abbiamo la probabilità P_2' che un elettrone arrivi al rivelatore attraverso la fenditura 2. Se ripetiamo questa misura per diversi valori di x , otteniamo le curve P_1' e P_2' della parte (b) della figura 37.

Non è poi così sorprendente: P_1' è molto simile alla curva P_1 ottenuta prima quando abbiamo chiuso la fenditura 2, e allo stesso modo P_2' è molto simile a P_2 . Quindi non succede niente di complicato, gli elettroni non passano attraverso entrambe le fenditure. Quando li guardiamo, vediamo che gli elettroni passano proprio come ci aspettiamo; sia che le fenditure siano aperte sia che siano chiuse, quelli che vediamo provenire dalla 1 sono distribuiti allo stesso modo se la 2 è aperta o chiusa.

Ma, un momento! Qual è *ora* la curva di probabilità *totale*, la probabilità che un elettrone arrivi al rivelatore per una qualsiasi strada? La risposta la sappiamo già: facciamo finta di non aver guardato i lampi di luce, e mettiamo insieme i dati che abbiamo diviso nelle due colonne. Dobbiamo semplicemente *sommare* i numeri. Infatti la probabilità che un elettrone arrivi sullo schermo, passando da qualsiasi foro, è proprio $P_{12}' = P_1 + P_2$. Cioè, siamo riusciti a guardare da quale fenditura passano gli elettroni, ma ora non abbiamo più la curva di interferenza P_{12} , ne abbiamo una nuova P_{12}' che non mostra interferenza! Se spegniamo la luce, ritroviamo P_{12} .

Siamo costretti a concludere che gli elettroni si distribuiscono

diversamente sullo schermo d'arresto *a seconda che noi li guardiamo oppure no*. Potrebbe forse essere la luce stessa ad alterare le cose. Dev'essere che gli elettroni sono molto delicati, e quando la luce li colpisce li sposta, e cambia il loro moto. Sappiamo che il campo elettrico della luce esercita una forza sulle cariche con cui interagisce; quindi forse è ragionevole aspettarsi che il moto venga alterato. Comunque, la luce esercita una grande influenza sugli elettroni, e cercando di «guardarli» abbiamo cambiato il loro moto. Cioè, il colpo che riceve l'elettrone quando diffonde il fotone di luce è sufficiente a cambiare il suo moto, così che se l'elettrone stava andando verso uno dei punti in cui P_{12} ha un massimo, ora cambia direzione e finisce in un punto di minimo: ecco perché non vediamo più gli effetti di interferenza.

Si potrebbe pensare: «Abbassate le luci! Usando una luce meno intensa, le onde luminose saranno più deboli e non disturberanno l'elettrone così tanto. Sicuramente, rendendo la luce sempre più debole, prima o poi l'onda sarà abbastanza delicata da avere un effetto trascurabile». Bene, proviamo. La prima cosa che si osserva è che i lampi provocati dal passaggio degli elettroni *non* diventano più deboli, *hanno sempre la stessa intensità*. L'unica cosa che succede se la luce è più soffusa è che a volte si sente un click nel rivelatore ma non si vede nessun lampo. L'elettrone è passato senza farsi vedere. In realtà stiamo semplicemente osservando che anche la luce funziona come gli elettroni; già sapevamo che si comporta come un'onda, ora scopriamo che si comporta anche come delle particelle. Arriva (o viene diffusa) sempre a pacchetti, che chiamiamo *fotoni*. Abbassando l'intensità della luce la dimensione dei fotoni non cambia, cambia solo quanti ne vengono emessi in ogni unità di tempo. Ecco perché, quando la luce è più soffusa, alcuni elettroni passano senza essere visti. Semplicemente non c'era un fotone nei dintorni quando è passato l'elettrone.

Tutto ciò è un po' scoraggiante. Se ogni volta che vediamo un elettrone il lampo di luce ha sempre la stessa intensità, ciò significa che vediamo solo gli elettroni che vengono perturbati. Tentiamo comunque l'esperimento con una luce molto debole. Ora quando sentiamo un click nel rivelatore metteremo un segno in una di tre colonne: nella prima se l'elettrone è passato dalla fenditura 1, nella seconda se è passato dalla 2 e nella terza se non l'abbiamo visto passare. Quando raccogliamo i nostri dati e calcoliamo le probabilità troviamo i seguenti risultati: gli elettroni che abbiamo visto passare

dalla fenditura 1 hanno una distribuzione come P_1' quelli visti passare dalla fenditura 2 hanno una distribuzione come P_2' (e quindi gli elettroni che siamo riusciti a vedere hanno una distribuzione come P_{12}'); quelli che non abbiamo visto affatto hanno una distribuzione «ondulatoria» molto simile a P_{12} nella figura 36! *Se gli elettroni non vengono osservati, c'è interferenza!*

Ciò è comprensibile. Quando non vediamo un elettrone, nessun fotone lo disturba, e quando lo vediamo vuol dire che un fotone lo ha perturbato. L'ammontare di perturbazione è sempre lo stesso, perché tutti i fotoni di luce producono effetti di uguale entità, e quando un elettrone diffonde un fotone ciò è sufficiente a cancellare qualsiasi effetto di interferenza. Ma non c'è un modo di vedere gli elettroni senza disturbarli? Abbiamo imparato in qualche capitolo precedente che la quantità di moto portata da un fotone è inversamente proporzionale alla sua lunghezza d'onda ($p = \hbar/\lambda$, dove $\hbar$ è la costante di Planck). Certamente il colpo che riceve l'elettrone quando diffonde il fotone verso i nostri occhi dipende dalla quantità di moto portata dal fotone. Aha! Allora se non vogliamo disturbare gli elettroni non dobbiamo diminuire l'intensità della luce, ma la *frequenza* (così aumentando la lunghezza d'onda). Usiamo una luce più rossa. Potremmo anche usare i raggi infrarossi, ovvero le onde radio (come il radar), e «vedere» dove va l'elettrone tramite qualche dispositivo che riesce a «vedere» la luce con lunghezza d'onda così grande. Forse se usiamo una luce meno violenta riusciremo a non disturbare così tanto gli elettroni.

Tentiamo quindi l'esperimento con onde più lunghe. Lo rifaremo molte volte, ogni volta usando luce di lunghezza d'onda più grande. All'inizio non sembra esserci alcun cambiamento; i risultati sono i medesimi. Poi succede una cosa terribile. Ricordate quando abbiamo parlato del microscopio, e abbiamo visto che, a causa della natura *ondulatoria* della luce, c'è una distanza minima tra due oggetti per poterli vedere distinti? Ebbene, questa distanza minima è dell'ordine di grandezza della lunghezza d'onda della luce; quindi ora, quando la lunghezza d'onda supera la distanza tra le due fenditure, vediamo un grande lampo indistinto quando gli elettroni diffondono luce, e non riusciamo più a dire da quale fenditura è passato l'elettrone, vediamo solo che è passato! Ed è solo con luce di questa lunghezza d'onda che il colpo ricevuto dall'elettrone è abbastanza piccolo da far assomigliare P_{12}' a P_{12} , cioè da far emergere qualche effetto di interferenza. E solo con lunghezze d'onda molto maggiori della

distanza tra le due fenditure la perturbazione è così piccola che si ha di nuovo la curva P_{12} della figura 36 (ma a quel punto non c'è assolutamente modo di determinare dove è passato l'elettrone).

Nel nostro esperimento abbiamo visto che è impossibile sistemare la luce in modo da riuscire a dire da quale fenditura è passato l'elettrone senza contemporaneamente alterare la distribuzione di probabilità. Heisenberg suggerì che le leggi della natura (allora nuove di zecca) potessero essere coerenti solo accettando una limitazione di base sulle nostre capacità sperimentali non riconosciuta precedentemente. Propose come principio generale il suo *principio di indeterminazione*, che possiamo enunciare a proposito del nostro esperimento nel modo seguente: «È impossibile progettare un apparato sperimentale che determini da quale fenditura passa l'elettrone e che allo stesso tempo non disturbi gli elettroni tanto da distruggere la figura di interferenza». Se un apparato riesce a determinare da quale fenditura passa l'elettrone *non può essere* così delicato da non disturbare la figura di interferenza in modo essenziale. Nessuno è mai riuscito a trovare (e nemmeno a immaginare) un modo di aggirare il principio di indeterminazione. Quindi dobbiamo accettare che descriva una caratteristica fondamentale della natura. L'intera teoria della meccanica quantistica che oggi usiamo per descrivere gli atomi e, in effetti, tutta la materia dipendono dall'esattezza del principio di indeterminazione. Dato che la meccanica quantistica ha ottenuto grandi successi la nostra fede nel principio di indeterminazione ne esce rinforzata. Ma se venisse scoperto un modo di sconfiggere il principio di indeterminazione, la meccanica quantistica darebbe risultati incoerenti e dovrebbe venire abbandonata come valida spiegazione della natura.

Mi direte: «E la proposizione A? è vero o non è vero che ogni elettrone o passa da una fenditura o dall'altra?». L'unica risposta possibile è: abbiamo scoperto sperimentalmente che per evitare l'incoerenza bisogna avere un certo particolare punto di vista, bisogna pensare in un certo modo. Quello che dobbiamo dire (per evitare previsioni errate) è quanto segue. Se si guardano le fenditure, o, più precisamente, se un apparato sperimentale è in grado di determinare da quale fenditura sono passati gli elettroni, allora si *può* dire che o passano da una fenditura, o dall'altra. Ma quando *non* si sta osservando la traiettoria di ogni elettrone, quando non c'è niente nell'esperimento che disturbi gli elettroni, come quando si

cerca di capire dove passano, allora *non si può* dire che ogni elettrone passa per una sola fenditura: se facciamo l'ipotesi che ogni elettrone passa per una fenditura e cominciamo a trarne deduzioni, arriveremo a conclusioni sbagliate. Questo è il filo logico su cui dobbiamo stare in equilibrio se vogliamo descrivere adeguatamente la natura.

Se il moto di tutta la materia, come quello degli elettroni, si può descrivere in termini di onde, cosa possiamo dire delle pallottole del nostro primo esperimento? Per quanto riguarda le pallottole possiamo dire che la lunghezza d'onda è così piccola che le figure di interferenza risultano molto fitte. Così fitte, infatti, che qualsiasi rivelatore di dimensione finita non riuscirebbe a distinguere i massimi dai minimi.

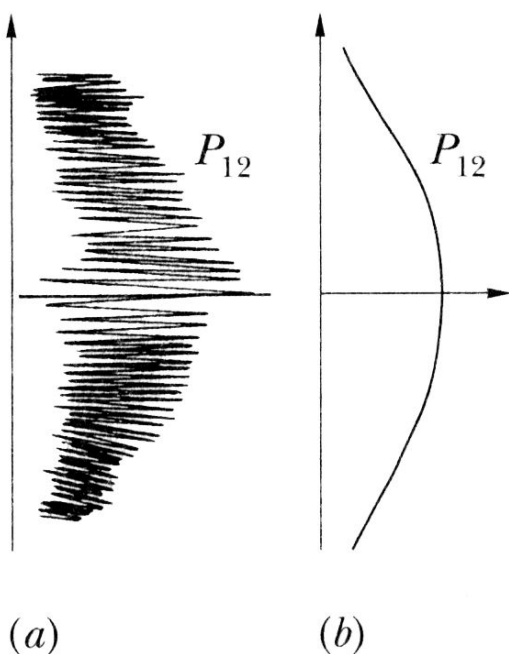


Fig. 38 - Figura di interferenza con pallottole: (a) effettiva (schematizzata), (b) osservata.

Quello che abbiamo visto è una sorta di media, che è la curva classica. Nella figura 38 abbiamo cercato di descrivere

schematicamente quello che succede con oggetti su larga scala. La parte (a) mostra la distribuzione di probabilità che la meccanica quantistica prevede. I picchi così fitti e vicini l'uno all'altro rappresentano la figura di interferenza che si ottiene con onde di lunghezza molto corta. Però qualsiasi rivelatore reale «prende» diversi picchi della curva di probabilità, e quindi le misurazioni mostrano la curva liscia della parte (b).

Primi principi di meccanica quantistica

Presenteremo ora un sommario delle conclusioni principali dei nostri esperimenti, e le esprimeremo in una forma generale che le renda vere per una classe generale di esperimenti di questo tipo. Questo compito sarà reso più semplice dalla definizione di «esperimento ideale»: un esperimento in cui non ci siano influenze esterne indeterminate, nessuna vibrazione o perturbazione di cui non possiamo tener conto. Una definizione abbastanza precisa potrebbe essere: un esperimento ideale è tale che tutte le condizioni iniziali e finali dell'esperimento sono completamente specificate. Chiameremo quindi «evento» un insieme specifico di condizioni iniziali e finali. (Per esempio: «Un elettrone parte dal cannone, arriva al rivelatore, e non succede nient'altro»). Riassumendo:

1) La probabilità di un evento in un esperimento ideale è data dal quadrato del valore assoluto di un numero complesso Φ detto *ampiezza di probabilità*:

$$[6] \quad P = |\Phi|^2 .$$

2) Quando un evento si può manifestare in più modi, l'ampiezza di probabilità dell'evento è la somma delle ampiezze di probabilità di ogni alternativa considerata separatamente. C'è interferenza:

$$[7] \quad \begin{aligned} \Phi &= \Phi_1 + \Phi_2 . \\ P &= |\Phi_1 + \Phi_2|^2 . \end{aligned}$$

3) Se si effettua un esperimento in grado di determinare quale

alternativa si verifica nella realtà, la probabilità dell'evento è la somma delle probabilità per ciascuna alternativa. L'interferenza si perde:

[8]

$$P=P_1 + P_2 .$$

Ci si potrebbe ancora chiedere: «Come funziona? Qual è il meccanismo dietro alla legge?». Nessuno l'ha mai scoperto. Nessuno è in grado di «spiegare» più di quanto abbiamo appena «spiegato», e nessuno riuscirà a darvi una rappresentazione più profonda e significativa della situazione. Non abbiamo idea di quale potrebbe essere un meccanismo fondamentale che produca questi risultati.

Vogliamo ora sottolineare una differenza molto importante tra meccanica classica e meccanica quantistica. Abbiamo parlato della probabilità che un elettrone arrivi in un certo punto in una data circostanza, e abbiamo dato per scontato che nel nostro apparato sperimentale (o perfino nel migliore apparato possibile) sarebbe impossibile prevedere esattamente cosa succede: possiamo solo calcolare la probabilità. Ma se questo è vero, significa che la fisica si è arresa, nella sfida di prevedere esattamente cosa succederà in una data circostanza. Ebbene sì. La fisica ha gettato la spugna. *Non sappiamo prevedere cosa succederà in una data circostanza*, e siamo anche convinti che sia impossibile, e che l'unica cosa prevedibile sia la probabilità dei diversi eventi. Bisogna riconoscere che questa è una seria limitazione, rispetto al nostro ideale originario di capire la natura. È un passo indietro, ma nessuno riesce a vedere il modo di evitarlo.

A volte è stata proposta la seguente ipotesi, per evitare la descrizione appena fatta: «Forse l'elettrone al suo interno presenta una qualche attività, forse ci sono variabili interne di cui non sappiamo nulla. E magari è proprio questa la ragione per cui non riusciamo a prevedere cosa succede. Se riuscissimo a guardare l'elettrone più da vicino riusciremmo a dire dove va a finire». Per quanto ne sappiamo, è impossibile; saremmo ancora in difficoltà. Supponiamo di accettare questa ipotesi, che all'interno dell'elettrone c'è un qualche meccanismo che determina la sua traiettoria. Quel meccanismo deve *anche* determinare da quale fenditura passa l'elettrone. Ma non dobbiamo dimenticare che quello che succede all'interno dell'elettrone non dovrebbe dipendere da quello che facciamo *noi*, e in

particolare non dovrebbe dipendere dal fatto che chiudiamo una fenditura oppure no. Quindi se un elettrone prima di partire ha già deciso da quale foro passare e dove andare a parare, dovremmo trovare P_1 per gli elettroni che scelgono la fenditura 1, P_2 per quelli che hanno scelto la 2, e necessariamente $P_1 + P_2$ per quelli che arrivano attraverso le due fenditure. Non vedo modo di evitare questo. Ma abbiamo verificato sperimentalmente che non succede così, e nessuno è riuscito a trovare una via d'uscita a questo rompicapo. Quindi ora come ora dobbiamo limitarci a calcolare probabilità. Diciamo «ora come ora», ma è forte il sospetto che questa limitazione ci perseguiterà per sempre, che è impossibile risolvere il rompicapo, e che la natura è proprio così.

Ecco la formulazione originale del principio di indeterminazione data da Heisenberg: se si effettua una misura su un oggetto, e si determina la componente x della sua quantità di moto con incertezza Δp , non si può contemporaneamente conoscere la sua posizione x con precisione maggiore di $\Delta x = h/\Delta p$. In ogni istante, il prodotto tra l'indeterminazione nella posizione e quella nella quantità di moto deve essere maggiore o uguale alla costante di Planck. Questo è un caso particolare del principio di indeterminazione che è stato enunciato sopra in modo più generale. L'enunciato più generale è che non si può progettare un'apparecchiatura in modo che determini quale alternativa si verifica, senza allo stesso tempo distruggere la figura di interferenza. Mostriamo in un caso particolare che una relazione del tipo di quella di Heisenberg deve necessariamente esistere per evitare guai. Modifichiamo l'esperimento della figura 36 montando la barriera con le fenditure su due rulli, così che possa muoversi liberamente su e giù (nella direzione x), come si vede nella figura 39. Osservando attentamente il movimento della barriera possiamo cercare di determinare da quale fenditura passa ogni elettrone. Immaginiamo cosa succede quando mettiamo il rivelatore nella posizione $x = 0$. Ci aspettiamo che per arrivare al rivelatore in quella posizione un elettrone che passa attraverso la fenditura 1 debba rimbalzare sui bordi. Dato che la componente verticale della quantità di moto dell'elettrone è cambiata, la barriera dovrà rinculare con uguale quantità di moto in direzione opposta; cioè la barriera riceve una spinta verso l'alto.

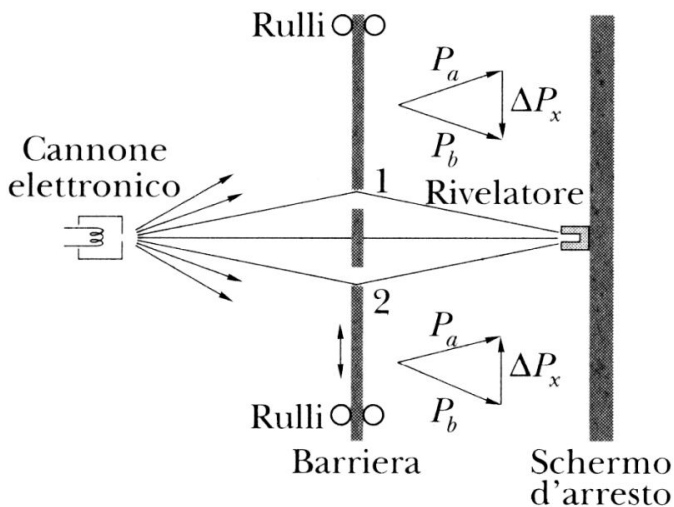


Fig. 39 - esperimento per misurare il rinculo della barriera.

Se l'elettrone passa dalla fenditura 2, analogamente la barriera riceve una spinta verso il basso. È chiaro che per ogni posizione del rivelatore la quantità di moto ricevuta dalla barriera avrà valori diversi a seconda che l'elettrone sia passato da un'apertura o dall'altra. Ci siamo! Senza disturbare affatto gli elettroni, ma solo guardando la barriera, possiamo determinare la loro traiettoria. Ora, per fare i calcoli bisogna conoscere esattamente la quantità di moto della barriera prima che passi l'elettrone, così che quando la misuriamo dopo il suo passaggio possiamo dedurre quanto è cambiata. Ma, ricordate, secondo il principio di indeterminazione non possiamo contemporaneamente conoscere la posizione della barriera con precisione arbitraria. Ma se non sappiamo esattamente dove si trova la barriera non possiamo dire con precisione dove siano le due fenditure. Saranno in un posto diverso per ogni elettrone che passa. Questo significa che il centro della nostra figura di interferenza sarà in un posto diverso per ogni elettrone. I picchi della figura di interferenza saranno «sbavati» uno sull'altro. È possibile dimostrare, con qualche calcolo, che se determiniamo la quantità di moto della barriera con esattezza sufficiente per poter stabilire, tramite la misura del rinculo, da quale apertura è passato l'elettrone, allora l'incertezza nella posizione della barriera sarà (secondo il principio di indeterminazione) tale da spostare la figura di interferenza giusto della distanza tra un massimo e il minimo

successivo. Uno spostamento di questo tipo è sufficiente per sbavare la figura, così che non si osserva interferenza. Il principio di indeterminazione «protegge» la meccanica quantistica. Heisenberg si rese conto che se si potessero misurare contemporaneamente la quantità di moto e la posizione con maggiore precisione la meccanica quantistica non starebbe più in piedi, e quindi propose che tale possibilità sia esclusa. A questo punto tutti si misero a cercare dei modi per aggirare il principio, ma nessuno riuscì a immaginare un modo per misurare la posizione e la quantità di moto di una cosa qualsiasi (un elettrone, una palla da biliardo, uno schermo, qualunque cosa) con precisione maggiore. La meccanica quantistica resiste, perigliosa ed esatta.

1)

La presente Prefazione si riferisce al complesso delle *Lectures on Physics*. ↵

2)

È possibile, in effetti, bruciare un diamante nell'aria. ↵

3)

Come corro! Che densità di contenuto in ognuna delle frasi di questa breve storia. «Le stelle sono fatte degli stessi atomi della Terra». Di solito un piccolo argomento come questo mi basta per una lezione intera. I poeti dicono che la scienza rovina la bellezza delle stelle, riducendole solo ad ammassi di atomi di gas. Solo? Anch'io mi commuovo a vedere le stelle di notte nel deserto, ma vedo di meno o di più? La vastità dei cieli sfida la mia immaginazione; attaccato a questa piccola giostra il mio occhio riesce a cogliere luce vecchia di un milione di anni. Vedo un grande schema, di cui sono parte, e forse la mia sostanza è stata eruttata da qualche stella dimenticata, come una, ora, sta esplodendo lassù. Oppure vederle con il grande occhio di Palomar correre via l'una dall'altra, allontanandosi da uno stesso punto in cui erano forse riunite tutte insieme. Qual è lo schema, quale il suo significato, il perché? Saperne qualcosa non distrugge il mistero, perché la realtà è tanto più meravigliosa di quanto potesse immaginare nessun artista del passato! Perché i poeti di oggi non ne parlano? Che uomini sono mai i poeti, che riescono a parlare di Giove pensandolo simile a un uomo, ma se è un'immensa sfera di metano e ammoniaca ammutoliscono?

4

4)

Lo scopo principale qui non è tanto la formula [3] (si veda sotto, p. 122), che probabilmente conoscete già, ma il fatto che ci si possa arrivare mediante un ragionamento teorico. ↵

5)

Un antibarione conta come -1 barione. $\leftarrow$

6)

Cioè di quanto, in un secondo, l'orbita si allontana dalla retta tangente nel punto in cui la Luna si trovava un secondo prima. ↵